

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Μελέτη και υλοποίηση με λογισμικό μοντέλων
διάδοσης ραδιοκυμάτων υπό συνθήκες βροχόπτωσης*



Του φοιτητή
Μπούμπουρα Νικολάου – Παναγιώτη
Αρ. Μητρώου: 517101

Επιβλέπουσα:
Ιωαννίδου Μελίνα
Καθηγήτρια

Ιανουάριος 2023

Μελέτη και υλοποίηση με λογισμικό μοντέλων διάδοσης ραδιοκυμάτων υπό συνθήκες βροχόπτωσης

Κωδικός Π.Ε. 17160

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Μπούμπουρας Νικόλαος – Παναγιώτης

Ονοματεπώνυμο εισηγητή : Ιωαννίδου Μελίνα

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε: 14-11-2021

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε: 20-01-2023

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μπούμπουρα Νικολάου – Παναγιώτη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των αποψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Η εικόνα του εξωφύλλου είναι διαθέσιμη στο <https://www.telecomreviewasia.com/>.

Για την οικογένειά μου

Πρόλογος

Η πρόοδος που έχει γνωρίσει ο τομέας των τηλεπικοινωνιών είναι αναμφισβήτητα τεράστια. από την αρχαιότητα, όπου ο Όμηρος μας μεταφέρει στα κείμενά του ότι η πτώση της Τροίας έγινε γνωστή στον Ελλαδικό χώρο από τις Φρυκτωρίες (μεγάλες φωτιές), η επικοινωνία επιτυγχανόταν με διάφορους τρόπους. Πλέον, μπορούμε να επικοινωνούμε από άκρη σ'άκρη της Γής, ακόμα και στο διάστημα με την χρήση ηλεκτομαγνητικών κυμάτων. Η εξέλιξη αυτή, βέβαια, δεν ήταν ακαριαία αλλά σταδιακή. Και σίγουρα, δεν ήταν εύκολη υπόθεση. Ο Νίκολα Τέσλα ασχολήθηκε με το μαγνητικό πεδίο και ανέπτυξε το τριφασικό σύστημα έναλασσόμενου ρεύματος. Ο Γουλιέλμο Μαρκόνι πέτυχε την εκπομπή ραδιοκυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις, εφευρίσκοντας το ραδιόφωνο. Ο Τζόν Λόνγκι Μπέρντ θα χρησιμοποιήσει ένα μηχανικό σύστημα σάρωσης και θα μεταδώσει μία εικόνα από ένα σημείο σε ένα άλλο, οδηγώντας σταδιακά στην ανακάλυψη της τηλεόρασης. Και τόσοι, μα τόσοι ακόμα αφανείς και μή που βάζοντας το λιθαράκι τους στο τεράστιο οικοδόμημα των τηλεπικοινωνιών συνέβαλαν τα μάλα ώστε να μπορούμε σήμερα να μιλάμε με τους αστροναύτες στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, να στέλνουμε έγγραφα και φωτογραφίες στην άλλη άκρη του κόσμου, και να δίνουμε λύσεις στους πιο σύνθετους υπολογισμούς. Όλα αυτά, από την άνεση του γραφείου μας.

Περίληψη

Οι απώλειες κατά τη διάρκεια σχεδιασμού μίας ζεύξης αποτελούν βασικό προβληματισμό των μηχανικών και των επιστημόνων. Πέραν των απωλειών ελεύθερου χώρου, ένας από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες που προκαλούν αυτές τις απώλειες είναι η βροχή. Οι απώλειες λόγω βροχόπτωσης είναι σημαντικές για συχνότητες άνω των 10 GHz. Στην εργασία αυτή μελετήσαμε τη συμπεριφορά της βροχόπτωσης και τους τρόπους με τους οποίους επηρεάζει μία ζεύξη, αναπτύσσοντας παράλληλα μία εφαρμογή σε περιβάλλον Matlab ώστε να υπολογίσουμε τελικά τις απώλειες αυτές. Η εφαρμογή που αναπτύξαμε δέχεται σαν δεδομένα τη συχνότητα, το ρυθμό βροχόπτωσης, τη μέγιστη απόσταση και τα κέρδη των κεραιών (αν υπάρχουν) και σχεδιάζει τις απώλειες συναρτήσει της απόστασης. Οι γραφικές παραστάσεις περιλαμβάνουν τις συνολικές απώλειες (συνδυαστικά λόγω διάδοσης στον ελεύθερο χώρο και σε περιβάλλον βροχόπτωσης), αλλά υπάρχει και η επιλογή για υπολογισμό απωλειών μόνο λόγω της βροχής. Υλοποιήθηκαν τέσσερα μοντέλα υπολογισμού απωλειών από βροχόπτωση: ITU-R.P 530-18, Mourfouma, Silva Melo και Singh, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα να εισάγουμε και να δούμε επιπλέον ρυθμούς βροχόπτωσης και συχνότητες ώστε να γίνουν συγκρίσεις ανάμεσα στις γραφικές παραστάσεις. Η μελέτη και η εφαρμογή μας έδειξαν ότι το μοντέλο της ITU εμφανίζει περισσότερες απώλειες απ' ό,τι τα υπόλοιπα μοντέλα σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Εξάιρεση αποτελεί το μοντέλο Singh το οποίο μέχρι την συχνότητα των 30 GHz και για ρυθμούς βροχόπτωσης μέχρι 10-15 mm/hr εμφανίζει περισσότερες απώλειες από εκείνο της ITU λόγω της μεγαλύτερης ειδικής απόσβεσης που υπολογίζει. Μετά από αυτές τις τιμές (συχνότητας και ρυθμού βροχόπτωσης) εμφανίζει λιγότερες απώλειες από την ITU. Η μελέτη μας έδειξε ότι σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων καθώς και για όλους τους ρυθμούς βροχόπτωσης, το μοντέλο που εμφανίζει τις λιγότερες απώλειες από τα υπόλοιπα είναι το Mourfouma.

Study and modeling of radiowave propagation in rain

Boumpouras Nikolaos-Panagiotis

Abstract

Losses during link design are a key concern of engineers and scientists. Apart from free space losses, one of the most decisive factors causing these losses is rain. Losses due to precipitation are significant for frequencies above 10 GHz. In this work we studied the behavior of precipitation and the ways in which it affects a link, while developing an application in a Matlab environment to finally calculate these losses. The application we developed takes as data the frequency, the rainfall rate, the maximum distance and the gains of the antennas (if any) and plots the losses as a function of the distance. The graphs include the total losses (combined due to free space propagation and in a rain environment), but there is also the option to calculate losses due to rain only. Four rainfall loss calculation models are implemented: ITU-R.P 530-18, Moupfouma, Silva Melo and Singh, and it is also possible to enter and view additional rainfall rates and frequencies to make comparisons between graphs. Our study and application showed that the ITU model shows more losses than the other models in the entire frequency range. An exception is the Singh model which up to the frequency of 30 GHz and for rainfall rates up to 10-15 mm/hr shows more losses than the ITU model due to the greater specific damping it calculates. After these values (precipitation frequency and rate) it shows less loss than ITU. Our study showed that in the whole spectrum of frequencies as well as for all rainfall rates, the model that shows the least losses than the rest is Moupfouma.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς ορισμένους ανθρώπους που ήταν καταλυτικοί για την εργασία αυτή.

Την κυρία Ιωαννίδου Μελίνα, καθηγήτριά μου και επιβλέπουσα της εργασίας, που μου προσέφερε όση βοήθεια χρειάστηκα και όποτε την χρειάστηκα.

Τον κύριο Ιωσηφίδη Αθανάσιο, καθηγητή μου, ο οποίος με έκανε να αγαπήσω τις τηλεπικοινωνίες και να εμβαθύνω περισσότερο σε αυτόν τον τομέα.

Τον Λασκαρέλια Βάιο, φίλο και απόφοιτο του Πολυτεχνείου Πατρών, για την πολύτιμη συμβολή του και τις συμβουλές του.

Και την οικογένειά μου. Που πάντα με στήριζε.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	v
Περίληψη	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων και πινάκων	xi
Συντομογραφίες	xiii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Βροχή και Drop Size Distribution	1
1.2 Δομή της εργασίας	5
Κεφάλαιο 2ο: Μοντέλα πρόβλεψης απωλειών	6
2.1 Το μοντέλο ITU-R P.530-18	8
2.1.1 Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών αερίων και περίθλασης σε εμπόδια.....	9
2.1.2 Απώλειες λόγω βροχόπτωσης.	11
2.1.3 Πλήθος συμβάντων εξασθένησης /διάρκεια απωλειών και μεταβολή στη γωνία άφιξης/αναχώρησης.....	13
2.1.4 Τεχνικές για εξάλειψη των απωλειών λόγω πολλαπλών διαδρομών	15
2.2 Το μοντέλο Mourfouma.....	18
2.2.1 Βροχή και απώλειες.....	18
2.2.2 Ισοδύναμο μονοπάτι διάδοσης για επίγειες ζεύξεις και παράγοντας ζL	18
2.2.3 Σύγκριση με ITU	20
2.3 Το μοντέλο Silva Mello.....	21
2.3.1 Περιγραφή του μοντέλου	21
2.3.2 Χρήση του μοντέλου ITU-R P.530-13	21
2.3.3 Μέθοδος Silva Mello.....	22
2.4 Το μοντέλο Singh	26
2.4.1 Μοντέλα πρόβλεψης, σύγκριση και απώλειες από βροχή.....	26
2.4.2 Παραμετροποίηση του μοντέλου	28
2.4.3 Συμπεράσματα.....	30
Κεφάλαιο 3ο: Ανάπτυξη της εφαρμογής στο περιβάλλον Matlab	31
3.1 Υπολογισμός απωλειών ελεύθερου χώρου – Free Space Path Loss	34

3.2	Υπολογισμός απωλειών λόγω βροχόπτωσης	37
3.2.1	Εφαρμογή στα μοντέλα	42
Κεφάλαιο 4ο:	Συγκρίσεις - Συμπεράσματα	51
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		54
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB		56

Κατάλογος Σχημάτων και πινάκων

Κατάλογος σχημάτων:

Σχήμα 1: Μελανοστρώματα [1].	1
Σχήμα 2: Σωρείτες [1].	2
Σχήμα 3: Διάφορα σχήματα σταγόνων [2].	2
Σχήμα 4: Τροπική Ζώνη [3].	3
Σχήμα 5: Δισδρόμετρο και τρόπος λειτουργίας [4], [5].	3
Σχήμα 6: Διατάραξη δέσμης Laser και μέγεθος σταγόνας [5].	4
Σχήμα 7: Τα στρώματα της Ατμόσφαιρας [7].	7
Σχήμα 8: ITU [9].	8
Σχήμα 9: Ειδική απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών αερίων [10].	10
Σχήμα 10: Η ακτίνα Fresnel (Fresnel Radius) [11].	11
Σχήμα 11: Πολλαπλές διαδρομές διάδοσης [8].	15
Σχήμα 12: Παράδειγμα προστασίας από ανακλάσεις [9].	16
Σχήμα 13: Έδαφος με ανακλαστικές επιφάνειες [8].	16
Σχήμα 14: Σύγκριση πραγματικών δεδομένων και εξίσωσης (2.22) [12].	19
Σχήμα 15: Σύγκριση ITU και Moupfouma [12].	20
Σχήμα 16: Διάμετρος ισοδύναμου μοντέλου d0 [13].	22
Σχήμα 17: Παράγοντας διόρθωσης σε σχέση με την απόσταση ζεύξης [13].	23
Σχήμα 18: Reff και πραγματικός ρυθμός βροχής [13]	
Σχήμα 19: deff και πραγματικός ρυθμός βροχής [13]	
	24
Σχήμα 20: Σύγκριση μοντέλων [16].	28
Σχήμα 21: Ειδική απόσβεση μοντέλου με συχνότητα για οριζόντια πόλωση και ITU [15].	30
Σχήμα 22: Ειδική απόσβεση μοντέλου με συχνότητα για κατακόρυφη πόλωση και ITU [15].	30
Σχήμα 23: Περιβάλλον Matlab.	31
Σχήμα 24: Παράθυρο Design View.	32
Σχήμα 25: Παράθυρο Code View.	33
Σχήμα 26: Εφαρμογή 1 ή Loss Calculator.	33
Σχήμα 27: Υπολογισμός απωλειών λόγω ελεύθερου χώρου.	34
Σχήμα 28: Παράδειγμα υπολογισμού απωλειών ελεύθερου χώρου για μία συχνότητα.	35
Σχήμα 29: Επιπλέον συχνότητες για σύγκριση.	36
Σχήμα 30: Εφαρμογή για απώλειες λόγω βροχόπτωσης.	37
Σχήμα 31: Υπολογισμός απωλειών με χρήση του μοντέλου ITU-R P.530-18.	38
Σχήμα 32: Υπολογισμός συνολικών απωλειών.	39
Σχήμα 33: Υπολογισμός απωλειών με χρήση του μοντέλου Silva Melo.	40
Σχήμα 34: Συνολικές απώλειες (Silva Melo + FSPL).	40
Σχήμα 35: Συνολικές απώλειες – Οριζόντια πόλωση (ITU-R P.530-18).	43
Σχήμα 36: Συνολικές απώλειες – Κατακόρυφη πόλωση (ITU-R P.530-18).	43
Σχήμα 37: Συνολικές απώλειες – Κυκλική πόλωση (ITU-R P.530-18).	44
Σχήμα 38: Συνολικές απώλειες – Οριζόντια πόλωση (Moupfouma).	45
Σχήμα 39: Συνολικές απώλειες – Κατακόρυφη πόλωση (Moupfouma).	45
Σχήμα 40: Συνολικές απώλειες – Κυκλική πόλωση (Moupfouma).	46
Σχήμα 41: Συνολικές απώλειες – Οριζόντια πόλωση (Silva Melo).	47

Σχήμα 42: Συνολικές απώλειες – Κατακόρυφη πόλωση (Silva Melo).....	47
Σχήμα 43: Συνολικές απώλειες – Κυκλική πόλωση (Silva Melo).	48
Σχήμα 44: Συνολικές απώλειες – Οριζόντια πόλωση (Singh).	49
Σχήμα 45: Συνολικές απώλειες – Κατακόρυφη πόλωση (Singh).	49
Σχήμα 46: Κυκλική πόλωση και μήνυμα λάθους.	50
Σχήμα 47: Οριζόντια πόλωση (20 GHz, 5mm/hr).	51
Σχήμα 48: Κατακόρυφη πόλωση (20 GHz, 5mm/hr).	51
Σχήμα 49: Οριζόντια πόλωση (20 GHz, 5mm/hr).	52
Σχήμα 50: Κατακόρυφη πόλωση (20 GHz, 5mm/hr).	52

Κατάλογος Πινάκων:

Πίνακας 1: Ζώνες Συχνοτήτων [6].....	6
Πίνακας 2: Ενδεικτικές τιμές σταθερών k και α [12].....	12

Συντομογραφίες

ITU	International Telecommunication Union
LOS	Line-Of-Sight (οπτική επαφή)
HM	Ηλεκτρομαγνητικό(-ς)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
DSD	Drop Size Distribution
FSPL	Free Space Path Loss
ΠΕ	Πτυχιακή Εργασία

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

Οι ανθρωπότητα εξέφραζε ενδιαφέρον για τις τηλεπικοινωνίες ανέκαθεν. Η ανάγκη για επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, οδήγησε τους “πατέρες των Τηλεπικοινωνιών” στην ανακάλυψη των ασυρμάτων μέσων, όπως είναι ο ασύρματος και το ραδιόφωνο. Μία ευρέως αποδεκτή διάκριση ανάμεσά τους, κάνει λόγο για 2 «ομάδες»: Τους εξερευνητές και τους εφευρέτες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι Michael Faraday (1791–1867), William Thomson (Lord Kelvin) (1824–1907), James Clerk Maxwell (1831–1879) και Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894). Στην δεύτερη ανήκουν οι Nikola Tesla (1856–1943), Guglielmo Marconi (1874–1937) και Alexander Popov (1859–1906). Όλοι τους συνέβησαν στην ανάπτυξη ηλεκτρικών κυκλωμάτων, τα οποία χρησιμοποιούν ΗΜ κύματα για να λάβουν και να στείλουν πληροφορίες, αλλάζοντας τη ζωή μας για πάντα. Το σημαντικότερο βήμα, ήταν η κατανόηση της **διάδοσης**, του τρόπου δηλαδή με τον οποίο μεταφέρονται τα κύματα από το ένα σημείο στο άλλο.

1.1 Βροχή και Drop Size Distribution

Κατά τη διάρκεια μίας βροχόπτωσης, οι κυψέλες της βροχής μεταβάλλονται από στρωματομόρφες σε κατακόρυφης μεταφοράς και αντίστροφα. Λόγω αυτής της μεταβολής στην δομή της βροχής, δεν είναι δυνατό να περιγραφεί με ακρίβεια η έντασή της. Είναι απαραίτητη λοιπόν η χρήση ενός ισοδύναμου μονοπατιού όπου η ένταση της βροχής θεωρείται σταθερή. Ανάλογα με το είδος της δηλαδή ανάλογα με τα σύννεφα από τα οποία προέρχεται, διακρίνεται σε **Στρωματομόρφη** και **Κατακόρυφης μεταφοράς**.

- **Nimbostratus σύννεφα (Μελανοστρώματα).** Σκούρα γκρι σύννεφα, σε χαμηλό ύψος, προκαλούν συνεχόμενης διάρκειας και σταθερής έντασης χιόνι και βροχή, προκαλούν την στρωματομόρφη βροχή [1].



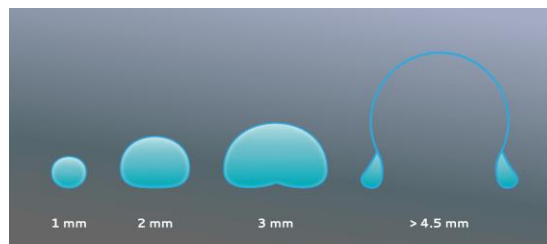
Σχήμα 1: Μελανοστρώματα [1].

- **Active cumulus σύννεφα (Σωρείτες).** Νέφη που έχουν μορφή βαμβακιού, σχηματίζονται της θερμές ώρες της ημέρας, έχουν σκούρα βάση και ενδέχεται να αφήσουν ψιχάλες. Προκαλούν τη βροχή κατακόρυφης μεταφοράς.
-



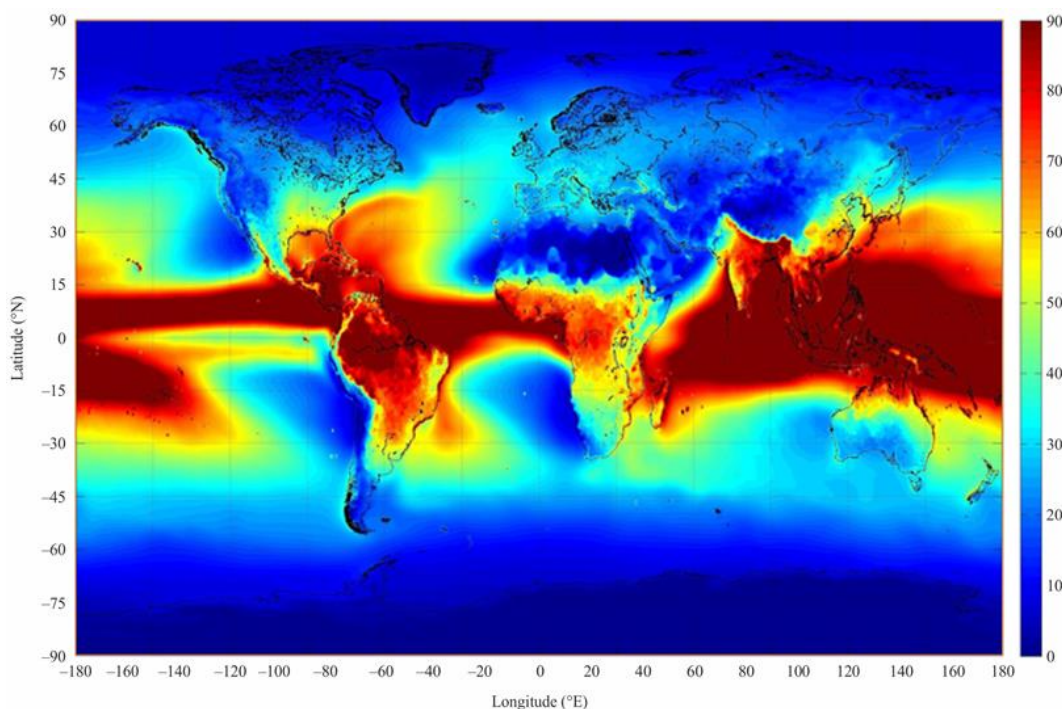
Σχήμα 2: Σωρείτες [1].

Η βασική διαφορά ανάμεσα στα μοντέλα που έχουν προταθεί για πρόβλεψη απωλειών είναι στην σχέση ανάμεσα στο χρόνο και τον χώρο που προσπαθεί να περιγράψει αυτά τα δύο φαινόμενα. Πολλές μέθοδοι χρησιμοποιούν το ρυθμό βροχής ως μοναδική μεταβλητή για τον υπολογισμό. Άλλες θεωρούν ότι οι σταγόνες της βροχής έχουν ένα και μοναδικό σχήμα (το οποίο δεν ισχύει όπως βλέπουμε στο Σχήμα 3 ενώ άλλες χρησιμοποιούν απλώς ένα παράγοντα μείωσης ο οποίος προέρχεται από την παράγωγο της συνάρτησης συσχέτισης της βροχής.



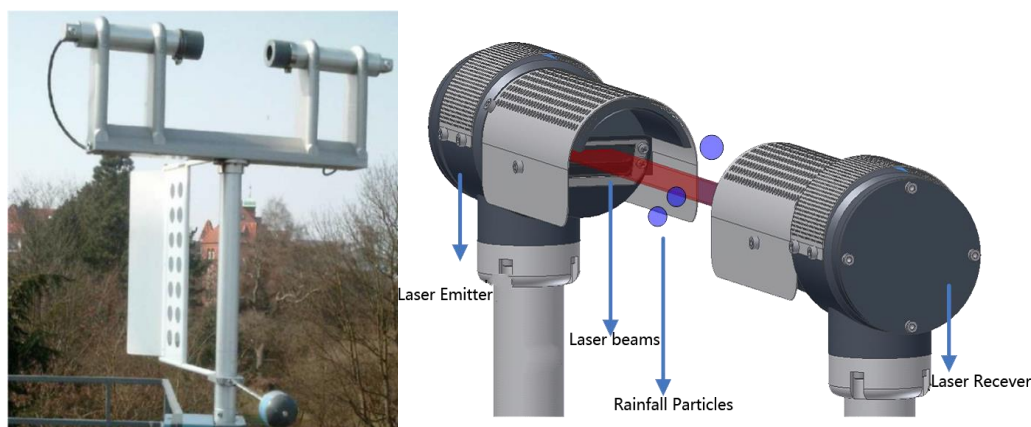
Σχήμα 3: Διάφορα σχήματα σταγόνων [2].

Κάτι που θα μας βοηθήσει ακόμα περισσότερο στην κατανόηση του φαινομένου της βροχόπτωσης, είναι το ITU-R P.837-7 [3]. Σε αυτό το recommendation μπορούμε να βρούμε πολλά στατιστικά στοιχεία που αφορούν την πιθανότητα βροχόπτωσης, καθώς και την πιθανότητα να υπερβεί ο όγκος του νερού ετησίως (λόγω βροχόπτωσης) μία συγκεκριμένη τιμή. Αναλύει και παρουσιάζει 8 βήματα που μπορούν να ακολουθηθούν ώστε να υπολογίσουμε αυτές τις πιθανότητες. Καταλήγει στον χάρτη του σχήματος 4 όπου: Οριζόντια βλέπουμε το γεωγραφικό μήκος σε μοίρες με βάση τον Ισημερινό (-180 έως 180) και κατακόρυφα είναι το γεωγραφικό πλάτος σε μοίρες με βάση τον Βορρά. Δεξιά του χάρτη, με κάθε χρώμα ξεκινώντας από το σκούρο μπλέ και καταλήγοντας στο σκούρο κόκκινο αυξάνεται η πιθανότητα βροχόπτωσης και αύξησης του όγκου του νερού λόγω αυτής. Έτσι, μπορούμε να δούμε πως στο εύρος -45 έως 45 μοίρες γεωγραφικού πλάτους Βόρεια και Νότια, δηλαδή κοντά στον Ισημερινό, είναι εκεί που συναντάμε την μεγαλύτερη πιθανότητα για τα παραπάνω φαινόμενα. Η κόκκινη λωρίδα που βλέπουμε στο χάρτη είναι η Τροπική Ζώνη. Βρίσκεται ανάμεσα στον τροπικό του Καρκίνου και τον τροπικό του Αιγόκερω, μετατοπίζεται στην περίοδο Απρίλιος-Σεπτέμβριος προς τον πρώτο τροπικό και την περίοδο Οκτώβριος-Μάρτιος προς τον δεύτερο τροπικό αντίστοιχα. Η ιδιαιτερότητα αυτή προκαλεί το λεγόμενο Τροπικό κλίμα που χαρακτηρίζεται ως θερμό και υγρό με θερμοκρασίες πάνω από 20 βαθμούς Κελσίου και 2 εποχές - μία βροχής και μία ξηρασίας. Όλα αυτά μπορούμε να τα δούμε στο σχήμα 4:



Σχήμα 4: Τροπική Ζώνη [3].

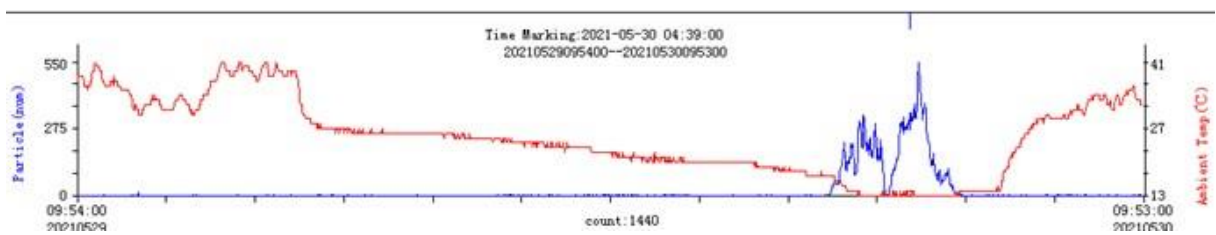
Προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η φυσική σημασία της βροχής, χρησιμοποιούμε το DSD (Drop Size Distribution). Σαν ορισμό έχουμε ότι είναι η κατανομή των σταγόνων της βροχής με βάση τη διάμετρό τους. Ανάλογα με το χρόνο που βρίσκονται οι σταγόνες σε ένα σύννεφο, μεταβάλλεται αντίστοιχα και η διάμετρος τους. Έτσι, μελετώντας αυτές τις διαμέτρους καταλήγουμε σε ένα τμήμα συνάρτησης gamma, με τιμές από μηδέν έως τη μέγιστη πιθανή διάμετρο μίας σταγόνας. Οι σταγόνες σχηματίζονται με 3 διαφορετικούς τρόπους: Συμπύκνωση υδρατμών που βρίσκονται στα σύννεφα, συνένωση πολλών μικρών σταγόνων σε μεγαλύτερες, και συγκρούσεις μεταξύ τους [4]. Το DSD μπορεί να μετρηθεί με ειδικά όργανα που λέγονται Δισδρόμετρα (disdrometers), σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες. Ορισμένες φορές μετράμε και την ταχύτητα πτώσης των σταγόνων ή του χιονιού, χαλαζιού κλπ. Ας περιγράψουμε πολύ σύντομα τις αρχές λειτουργίας του δισδρομέτρου.



Σχήμα 5: Δισδρόμετρο και τρόπος λειτουργίας [4], [5]

Αρχικά, το όργανο αυτό εντοπίζει το σχήμα και την ταχύτητα της σταγόνας (αφού μας ενδιαφέρει η βροχή). Αυτό γίνεται είτε με επαφή/πρόσκρουση σταγόνας σε μία επιφάνεια με αισθητήρες, είτε με οπτικά μέσα δηλαδή με χρήση Laser. Στην αριστερή εικόνα του Σχήματος 5,

ανάμεσα τις 2 μαύρες βάσεις, τις οποίες ονομάζουμε περιοχή δείγματος και φαίνονται στο κέντρο, διέρχεται μία οριζόντια δέσμη Laser μήκους κύματος 650 nm. Ενώ η σταγόνα περνά και την ‘διακόπτει’, το ηλεκτρονικό κύκλωμα παράγει ένα σήμα. Αυτό με τη σειρά του ενισχύεται με μεγάλη ακρίβεια και μετατρέπεται σε ψηφιακό στην θέση του υποδοχέα που βλέπουμε στη δεξιά εικόνα(Laser Receiver). Όλα αυτά τα δεδομένα μεταφέρονται σε ένα μικροελεγκτή που είναι υπεύθυνος να χρησιμοποιήσει όλα τα δεδομένα, να τα μελετήσει στατιστικά και να τα μεταφέρει στον υπολογιστή του μελετητή. Όταν δεν ‘πέφτει’ καμία σταγόνα πάνω στη δέσμη του Laser, το σήμα είναι μέγιστο. Εάν περάσει κάποια σταγόνα από την οριζόντια δέσμη, μπλοκάρει ένα μέρος της και μειώνεται το σήμα εξόδου. Έτσι με βάση αυτή τη μείωση, μπορούμε να μετρήσουμε και πραγματικά το μέγεθος της σταγόνας. Στο σχήμα 6 βλέπουμε ακριβώς αυτή τη διατάραξη που προκαλείται:



Σχήμα 6: Διατάραξη δέσμης Laser και μέγεθος σταγόνας [5].

Με κόκκινο χρώμα βλέπουμε την διατάραξη. Με βάση τις τιμές του άξονα y [Particle(nm)], βλέπουμε το μέγεθος της σταγόνας που μόλις διαπέρασε τη δέσμη.

1.2 Δομή της εργασίας

Σε αυτή την εργασία γίνεται μία αναφορά βασικών στοιχείων και εξισώσεων σχετικά με μοντέλα διάδοσης που έχουν αναπτυχθεί από την ITU, καθώς και από άλλους αναγνωρισμένους επιστήμονες. Παράλληλα, γίνεται και μία προσπάθεια πρόβλεψης και υπολογισμού των απωλειών που υπάρχουν σε μία τηλεπικοινωνιακή μικροκυματική ζεύξη με χρήση των μοντέλων αυτών. Η εργασία αυτή λαμβάνει υπόψιν δύο παράγοντες, που είναι ο ελεύθερος χώρος ανάμεσα σε πομπό και δέκτη και την βροχόπτωση που μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία της.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, γίνεται ανάλυση των μοντέλων. Αρχικά, μιλάμε για τον ελεύθερο χώρο, στην εισαγωγή του κεφαλαίου 2. Έπειτα, ορίζουμε κάποιες έννοιες απαραίτητες για καλύτερη κατανόηση της ΠΕ, καθώς και γίνεται μία αναφορά στο μοντέλο απωλειών ελεύθερου χώρου το οποίο είναι και ο βασικότερος παράγοντας απωλειών σε μία ζεύξη. Ακολουθεί η ενότητα 2.1 όπου γίνεται ανάλυση του μοντέλου απωλειών λόγω βροχόπτωσης που προτείνει η ITU, με την ονομασία ITU-R P.530-18. Η βάση όλων των μοντέλων, χρησιμοποιείται ως πρότυπο από όλους τους ερευνητές που ασχολήθηκαν και ασχολούνται με την βροχόπτωση, μίας και τα στοιχεία του προτύπου έχουν επαληθευτεί πειραματικά πολλές φορές από το 1994 που εκδόθηκε για πρώτη φορά, φτάνοντας αίσίως στο μοντέλο του 2021 που είναι και σε ισχύ αυτή τη στιγμή. Παράλληλα προσφέρει πληροφορίες και για άλλα φαινόμενα όπως απώλειες από ατμοσφαιρικά αέρια και εμπόδια που μπορεί να επηρεάσουν την επικοινωνία ανάμεσα σε πομπό και δέκτη. Προχωρώντας, στην ενότητα 2.2, συναντάμε το μοντέλο του Καναδού Fidele Mourfouma ο οποίος χρησιμοποίησε τα δεδομένα της ITU και δημιούργησε το δικό του μοντέλο για να διορθώσει κάποιες λεπτομέρειες. Δίνει κάποιους καινούργιους ορισμούς και κάνει χρήση νέων εννοιών όπως το *ισοδύναμο μονοπάτι διάδοσης*, που βοηθά περισσότερο στη μελέτη, δεν αποτελεί υπαρκτό, μετρήσιμο μέγεθος και μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Ακολουθεί η ενότητα 2.3 που πραγματεύεται το μοντέλο Silva Mello, το οποίο προτείνεται από τον Βραζιλιάνο επιστήμονα Luiz Da Silva Mello το 2011. Έχοντας ως γνώμονα και πάλι το μοντέλο της ITU, ακολουθεί μία διαφορετική προσέγγιση χρησιμοποιώντας τον *ενεργό ρυθμό βροχόπτωσης*, ένα μέγεθος που μας δείχνει πραγματικά το ρυθμό βροχής που επηρεάζει μία ζεύξη, και όχι τον ολικό όγκο νερού που μετράμε σε κάθε άλλη περίπτωση. Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι πολύ κοντά σε αυτά της ITU, ωστόσο δίνει μεγαλύτερη βάση σε λεπτομέρειες που αφορούν άλλα ποσοστά χρόνου και διαφορετικά είδη βροχής. Συνεχίζουμε στην ενότητα 2.4 όπου ο Ινδός Hitesh Singh προτείνει το δικό του μοντέλο για υπολογισμό απωλειών λόγω βροχόπτωσης. Είναι το πιο πρόσφατο από τα άλλα 2 καθώς εκδίδεται αυτούσιο το 2020, και επιδέχεται ορισμένες διορθώσεις το 2021. Ξεκινά με μία αναφορά και μία ιστορική αναδρομή στα μοντέλα που έχουν προηγηθεί και παραθέτει ορισμένα λιγότερο γνωστά. Κάνοντας χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου ορίζει τις εξισώσεις που χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό ακολουθώντας ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο με τρία πολύ απλά βήματα. Είναι το ευκολότερο για υπολογισμό από τα 4 μοντέλα απωλειών καθώς χρειάζεται μόνο τη συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης καθώς και το ρυθμό βροχόπτωσης. Εμφανίζει μικρότερο αριθμό απωλειών για ορισμένες τιμές συχνοτήτων και ρυθμών βροχόπτωσης από το μοντέλο της ITU, ωστόσο αποτελεί μία γενικευμένη μορφή του. Συνεχίζοντας, στο κεφάλαιο 3 βλέπουμε την εφαρμογή, τους υπολογισμούς και τις γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζει καθώς και ορισμένα τμήματα κώδικα που ήταν πολύ σημαντικά για την ανάπτυξη της. Τέλος, τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις όλης της εργασίας βρίσκονται στο κεφάλαιο 4 όπου υπάρχουν και συγκρίσεις ανάμεσα στα μοντέλα, προσφέροντάς μας μία ολοκληρωμένη εικόνα για την μελέτη που κάναμε στα πλαίσια της ΠΕ και τα αποτελέσματά της, με χρήση της εφαρμογής μας. Στο παράρτημα Α βρίσκεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε και για τις 3 επιμέρους εφαρμογές που αναπτύχθηκαν.

Κεφάλαιο 2ο: Μοντέλα πρόβλεψης απωλειών

Αρχικά, προκειμένου να μπορούμε να κατανοήσουμε και να ακολουθήσουμε τη συλλογιστική πορεία των παρακάτω παρατηρήσεων και στοιχείων, είναι απαραίτητη μία εισαγωγή σε βασικές έννοιες με τις οποίες θα ασχοληθούμε παρακάτω. Η βασικότερη έννοια που πρέπει να αναφερθεί, είναι αυτή της διάδοσης ραδιοκυμάτων, μέσα στην οποία συμπεκνώνονται όλες οι συμπεριφορές των ραδιοκυμάτων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς/διάδοσής τους από ένα σημείο σε ένα άλλο στο κενό (vacuum) ή σε άλλα τμήματα της ατμόσφαιρας. Όπως κάθε άλλο ΗΜ κύμα, και τα ραδιοκύματα επηρεάζονται από φαινόμενα όπως η ανάκλαση, η διάθλαση, η απορρόφηση κ.α. Υπάρχουν πολλές μορφές διάδοσης, ωστόσο αυτή που θα μας απασχολήσει είναι η **Line-of-Sight (LOS)** διάδοση, το οποίο σημαίνει ότι το κύμα διαδίδεται σε μία ευθεία γραμμή από τον πομπό στο δέκτη. Συνήθως χρησιμοποιείται για μεσαίες αποστάσεις διάδοσης, όπως για τις κινητές επικοινωνίες, για walkie-talkies, για τις τηλεοράσεις και τα ραντάρ. Η διάκριση ανάμεσα στις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στη διάδοση, καθώς και τα αντίστοιχα μήκη κύματος, φαίνονται στον πίνακα 1:

Πίνακας 1: Ζώνες Συχνοτήτων [6]

Ζώνη	Ονομασία	Συχνότητα	Μήκος κύματος
VLF	Very Low Frequency	3 KHz - 30 KHz	100 km - 10 km
LF	Low Frequency	30 KHz - 300 KHz	10 km - 1 km
MF	Medium Frequency	300 KHz - 3 MHz	1 km - 100 m
HF	High Frequency	3 MHz - 30 MHz	100 m - 10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHz - 300 MHz	10 m - 1 m
UHF	Ultra High Frequency	300 MHz - 3 GHz	1 m - 10 cm
SHF	Super High Frequency	3 GHz - 30 GHz	10 cm - 1 cm
EHF	Extremely High Frequency	30 GHz - 300 GHz	1 cm - 1 mm

Στις ζώνες MF, LF και VLF τα κύματα μπορούν να κάμπτονται από λόφους και άλλα εμπόδια ακολουθώντας πάντα την καμπυλότητα της Γης. Αυτά τα κύματα ονομάζονται επιφανειακά ή εδάφους. Ορισμένες φορές, στις ζώνες MF και HF, προκαλείται διάθλαση στην Ιονόσφαιρα, δηλαδή τα ΗΜ κύματα αναχωρούν από τον πομπό με μία συγκεκριμένη γωνία μετάδοσης προς τον ουρανό και καταλήγουν στο δέκτη διανύοντας τεράστιες αποστάσεις. Αυτά τα κύματα ονομάζονται Ιονοσφαιρικά. Τέλος, διακρίνουμε ακόμη μία κατηγορία κυμάτων, τα τροποσφαιρικά. Αναφερόμαστε κυρίως στις ζώνες UHF και SHF, όπου λαμβάνει χώρα το ίδιο φαινόμενο με παραπάνω, απλώς στη ζώνη της Τροπόσφαιρας. Η κύρια διαφορά των δύο, είναι ότι καθώς η τροπόσφαιρα είναι πιο

«κοντά» στο έδαφος από την Ιονόσφαιρα, τα κύματα που σκεδάζονται στην πρώτη θα ταξιδεύουν σε μικρότερες αποστάσεις από την δεύτερη [7]. Στο σχήμα 7 φαίνεται και η διάκριση αυτή:



Σχήμα 7: Τα στρώματα της Ατμόσφαιρας [7].

Καθώς αυτά τα κύματα διαδίδονται στο χώρο, θα υποστούν κάποιες απώλειες. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: 1)Απώλειες διάδοσης (path loss). 2)Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. 3)Διαλείψεις μικρής κλίμακας. Εμείς θα μελετήσουμε την πρώτη κατηγορία. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ως απώλειες διάδοσης ορίζουμε το λόγο της λαμβανόμενης προς την εκπεμπόμενη ισχύ σε μία ζεύξη. Για τον υπολογισμό των απωλειών αυτών, έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα που χωρίζονται σε 4 βασικές κατηγορίες [8]:

- 1) Αναλυτικά μοντέλα: Μοντελοποιούν όλα τα εμπόδια με φυσικό και απλό τρόπο ώστε να είναι ευκολότερη η μελέτη τους.
- 2) Εμπειρικά μοντέλα: Χρησιμοποιούν τα μαθηματικά, τις μετρήσεις και τα πειραματικά δεδομένα για τον υπολογισμό.
- 3) Στατιστικά μοντέλα: Χρησιμοποιούν στατιστικά μοντέλα και προσεγγίζουν τα φαινόμενα με στατιστικές.
- 4) Υβριδικά μοντέλα: Χρησιμοποιούν στοιχεία από 2 ή και τα 3 παραπάνω μοντέλα.

Το πρώτο μοντέλο που θα μελετήσουμε, είναι αυτό του ελεύθερου χώρου (**FSPL**). Το μοντέλο απωλειών ελεύθερου χώρου (**Free Space Path Loss**) υπολογίζει την εξασθένιση της ραδιοηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα σε δύο κεραίες η οποία οφείλεται στο ελεύθερο από εμπόδια μονοπάτι διάδοσης, και στον κενό χώρο ανάμεσα τους. Η IEEE ορίζει τις απώλειες ελεύθερου χώρου ως την εξασθένιση δύο ιστροπικών κεραιών στον ελεύθερο χώρο, που εκφράζεται ως λόγος ισχύος. Η έννοια των απωλειών ελεύθερου χώρου δεν μας προσφέρει κάτι μόνη της. Συνήθως παρουσιάζεται ως τμήμα της εξίσωσης του Friis για τον ελεύθερο χώρο [8]:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{(4\pi d/\lambda^2)} \quad (\sigma\epsilon W) \quad (2.1)$$

Όπου P_R είναι η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη, G_T είναι το κέρδος της κεραίας εκπομπής, G_R το κέρδος της κεραίας λήψης, d η απόσταση των δύο κεραιών και λ το μήκος κύματος που προκύπτει από τη συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης. Τελικά, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες ελεύθερου χώρου, για ιστροπικές κεραίες, από την σχέση [8]:

$$L_{bf}[dB] = 32.44 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d \quad (2.2)$$

Πρέπει να σημειώσουμε εδώ, ότι η συχνότητα λειτουργίας της ζεύξης f πρέπει να δίνεται σε MHz, και η απόσταση της ζεύξης d πρέπει να δίνεται σε km. Τέλος, όταν έχουμε κι άλλες απώλειες εκτός από του ελεύθερου χώρου, θα προστίθονται σε αυτές τους ελεύθερου χώρου, σε λογαριθμική

κλίμακα. Εάν πάλι έχουμε τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης, αυτά αφαιρούνται από τις συνολικές απώλειες. Άλλες απώλειες είναι αυτές του μέσου διάδοσης (L_m) όπως τα ατμοσφαιρικά αέρια κλπ, απώλειες στα κυκλώματα των κεραιών (L_c) και απώλειες από τα καλώδια τροφοδοσίας των κεραιών.

2.1 Το μοντέλο ITU-R P.530-18

Το μοντέλο ITU-R P.530-18 [9] αποτελεί το κατεξοχήν μοντέλο υπολογισμού απωλειών λόγω διαφόρων φαινομένων, καθώς και από βροχή, που είναι και το αντικείμενο που πραγματεύεται αυτή η πτυχιακή εργασία. Περιγράφει λεπτομερώς τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να σχεδιάζεται και να υλοποιείται μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη, ορίζει με ακρίβεια τα πρότυπα στα οποία πρέπει να «υπακούει» και το τι πρέπει να προσφέρει. Πιο συγκεκριμένα παρέχει, βήμα-βήμα, τις διαδικασίες που ακολουθούνται για την ελαχιστοποίηση των απωλειών, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό.



Σχήμα 8: ITU [9]

Πολλοί ερευνητές και επιστήμονες που μελετούν την βροχόπτωση σαν φαινόμενο απωλειών χρησιμοποιούν τα δεδομένα του προτύπου ITU-R P.530-18 για να επαληθεύσουν τις μετρήσεις τους καθώς θεωρείται το πρότυπο που είναι αποδεκτό από όλη την επιστημονική κοινότητα. Έτσι, η ITU προτείνει το μοντέλο αυτό καθώς:

α) Για το σχεδιασμό επίγειων LOS συστημάτων χρειάζονται επαρκή δεδομένα και αξιόπιστα μοντέλα πρόβλεψης απωλειών.

β) Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που επιτρέπουν την πρόβλεψη σημαντικών παραμέτρων που αφορούν τον σχεδιασμό των LOS συστημάτων.

γ) Οι ανωτέρω μέθοδοι έχουν επαληθευτεί με πειραματικά δεδομένα.

Έτσι, η ITU, προτείνει το μοντέλο αυτό, στο οποίο μπορούμε να βρούμε οτιδήποτε πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό μίας ζεύξης. Παράλληλα, μπορούμε να εντοπίσουμε ακόμη μία πιθανότητα, αυτή κατά την οποία μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη -επικοινωνία ανάμεσα σε πομπό και δέκτη- χάνεται εντελώς. Αυτό το γεγονός οφείλεται στις απώλειες τις οποίες θα υπολογίσουμε παρακάτω. Το συγκεκριμένο πρότυπο μας παρέχει τα βήματα για να μπορούμε να προβλέψουμε το χρονικό διάστημα όπου λαμβάνει χώρα αυτό το γεγονός, για ποιο ποσοστό του χρόνου η ζεύξη μας είναι «κάτω» όπως θα λέγαμε, δηλαδή να έχουμε απώλεια επικοινωνίας ανάμεσα σε πομπό-δέκτη. Τελικά, η ITU έχοντας υπόψιν τα παρακάτω φαινόμενα, μας δίνει το πρότυπο 530-18:

- Απώλειες από περίθλαση λόγω εμποδίων από το έδαφος στη διαδρομή εκπομπής.
- Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών αερίων.

- Απώλειες λόγω διασποράς της κύριας δέσμης ακτινοβολίας του σήματος /πολλών διαδρομών που ακολουθεί το σήμα στην ατμόσφαιρα.
- Εξασθένιση λόγω αλληλεπίδρασης του σήματος με τα μόρια της ατμόσφαιρας (υδρατμοί, χιόνι, βροχή κλπ).
- Μεταβολή στην γωνία λήψης του δέκτη και στην γωνία αποστολής στον σταθμό του εκπομπού.
- Μείωση του Cross-Polar Discrimination (XPD).
- Παραμόρφωση του σήματος από εξασθένιση συγκεκριμένων συχνοτήτων και καθυστερήσεων.

Σε αυτή την ενότητα θα ασχοληθούμε με τα φαινόμενα που συνεισφέρουν στις συνολικές απώλειες διάδοσης. Αυτά τα φαινόμενα είναι: α) ατμοσφαιρικά αέρια, β) περίθλαση σε εμπόδια, γ) διασπορά της κύριας δέσμης ακτινοβολίας, δ) μεταβολή γωνιών αποστολής-λήψης, ε) βροχή/χιόνι/χαλάζι, και στ) αμμοθύελλες και σκόνη. Κάθε ένα από αυτά τα φαινόμενα έχει το δικό του κομμάτι ευθύνης και λαμβάνονται όλα υπόψιν ανάλογα και με τη συντότητα λειτουργίας, την απόσταση της ζεύξης καθώς και την γεωγραφική θέση. Ενώ λ.χ η πιθανότητα βροχής σε περιοχές με έρημο είναι πολύ μικρή, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ώστε ο σχεδιασμός της ζεύξης να είναι λεπτομερής και αξιόπιστος. Παρακάτω θα ασχοληθούμε με αυτά τα φαινόμενα λεπτομερώς και με το καθένα ξεχωριστά ώστε να έχουμε μία σαφή εικόνα για το αντικείμενο που μελετάμε.

2.1.1 Απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών αερίων και περίθλασης σε εμπόδια

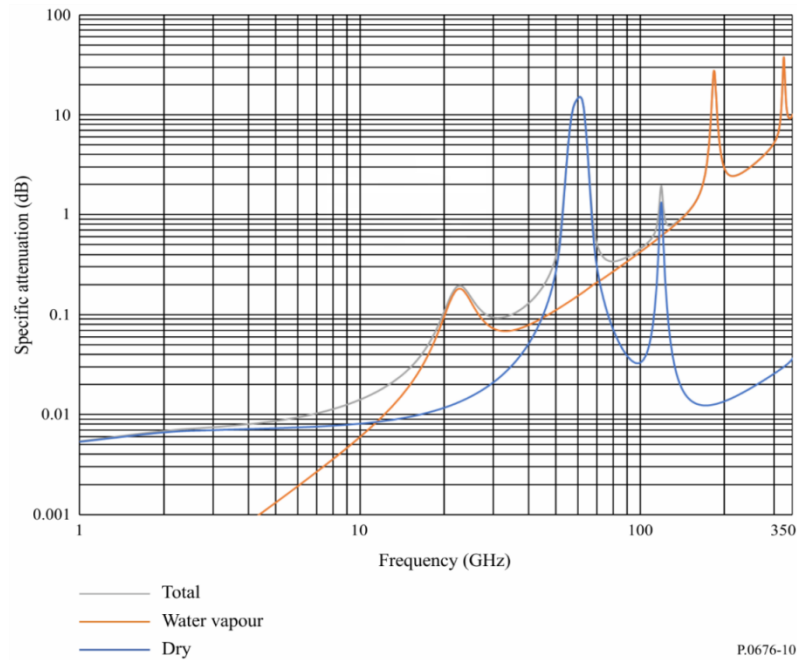
Ορισμένες απώλειες οφείλονται στην απορρόφηση ΗΜ ενέργειας, λόγω συντονισμού με μόρια οξυγόνου και υδρατμών. Όπως ξέρουμε, η ατμόσφαιρα, σε συνθήκες ξηρού αέρα, αποτελείται από Αζωτο (N_2) και οξυγόνο (O_2) σε ποσοστό 99%. Το υπόλοιπο 1% είναι διάφορα άλλα σπάνια στοιχεία. από όλα τα παραπάνω στοιχεία, μόνο το οξυγόνο επηρεάζει τα ραδιοκύματα, επομένως είναι και το μόνο που μας αφορά στον υπολογισμό των απωλειών. Η παρουσία υδρατμών στην ατμόσφαιρα οδηγεί στην εμφάνιση επιπλέον απωλειών. Όλα τα παραπάνω, πρέπει να περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς των συνολικών διαλείψεων, σε συχνότητες βέβαια άνω των 20 GHz [10].

Για να τις υπολογίσουμε, ακολουθούμε την παρακάτω εξίσωση:

$$A_{\alpha} = \gamma_{\alpha} \times d \text{ (σε dB)} \quad (2.3)$$

Με γ_{α} συμβολίζουμε την ειδική απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών αερίων, και με d την απόσταση ανάμεσα στις δύο κεραίες (εκπομπής-λήψης).

Την ειδική απόσβεση την βρίσκουμε από το σχήμα παρακάτω. Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής: Εντοπίζουμε τα γ_0 (ειδική απόσβεση οξυγόνου-dry-μπλέ χρώμα) και γ_w (ειδική απόσβεση υδρατμών-water vapour- κόκκινο χρώμα) που βρίσκονται στον κατακόρυφο άξονα, με βάση τη συχνότητα λειτουργίας που βρίσκεται στον οριζόντιο άξονα. Η ειδική απόσβεση προκύπτει από το άθροισμα των δύο.



Σχήμα 9: Ειδική απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών αερίων [10].

Απώλειες λόγω περίθλασης σε εμπόδια:

Όταν η ατμόσφαιρα γίνεται επαρκώς ανακλαστική, δηλαδή χαρακτηρίζεται από μεγάλες θετικές τιμές του δείκτη διάθλασης και από χαμηλές τιμές του συντελεστή k , και καθώς η Γή κινείται γύρω από τον άξονά της, τα ΗΜ κύματα αντιλαμβάνονται την κίνηση αυτή ως εμπόδιο στην ευθεία της πορείας τους με αποτέλεσμα να κάμπτονται. Έτσι έχουμε απώλειες που οφείλονται σε αυτό το φαινόμενο, που το ονομάζουμε περίθλαση. Αυτός ο παράγοντας καθορίζει σε τι ύψη θα τοποθετηθούν οι κεραίες εκπομπής και λήψης.

- Συντελεστής k : Ορίζουμε το κλάσμα του ενεργού μήκους της ακτίνας της γής προς το πραγματικό μήκος της ακτίνας της. Στη βιβλιογραφία, συνήθως, η τιμή του είναι ίση με $4/3$.

Οι απώλειες λόγω περίθλασης εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους και τη βλάστηση. Ανάλογα, λοιπόν, με τη διαδρομή που μελετάμε, οι απώλειες κυμαίνονται από ελάχιστες (για ένα μόνο εμπόδιο όπως π.χ ένα βουνό) έως και μέγιστες. Δεδομένα για αυτό το φαινόμενο μπορούμε να βρούμε σε άλλο πρότυπο της ITU. Έτσι, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση (για πάνω από 15dB):

$$A_d = -20 \frac{h}{F_1} + 10 \text{ (σε dB)} \quad (2.4)$$

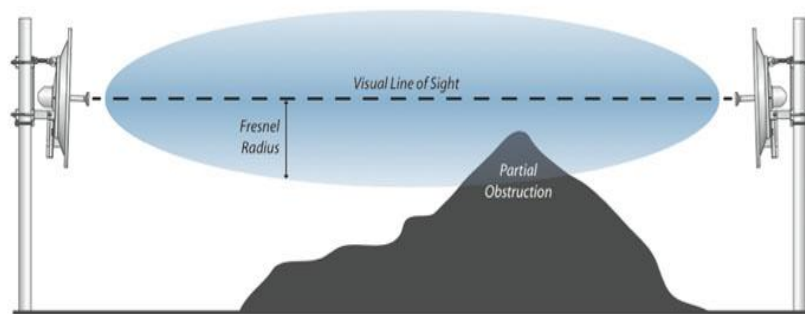
Όπου h είναι η διαφορά ύψους ανάμεσα στο μεγαλύτερο εμπόδιο και την ευθεία εκπομπής-λήψης του σήματος (μπορεί να είναι αρνητικό εάν το εμπόδιο είναι κάτω από την ευθεία εκπομπής-λήψης), και F_1 η ακτίνα της πρώτης ζώνης Fresnel που δίνεται ως:

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f \times d}} \text{ (σε m)} \quad (2.5)$$

Με d_1 συμβολίζουμε την απόσταση του δέκτη από το εμπόδιο (π.χ βουνό) σε km , με d_2 την απόσταση του πομπού από το εμπόδιο σε km , με d την απόσταση της ζεύξης/απόσταση ανάμεσα στους δύο σταθμούς σε km , και με f την συχνότητα λειτουργίας σε GHz .

Ζώνη Fresnel: Είναι μία ελλειπτική περιοχή που περιβάλλει τη νοητή ευθεία της οπτικής επαφής του πομπού με το δέκτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 10. Το μέγεθος της έλλειψης καθορίζεται από τη συχνότητα λειτουργίας και την απόσταση ανάμεσα στις 2 κεραίες. Είναι σημαντικός ο υπολογισμός της μέγιστης ακτίνας αυτής της περιοχής γιατί ακόμα και αν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, ένα εμπόδιο (λόφος, δάσος) που βρίσκεται μέσα στην ζώνη Fresnel με μέγεθος τέτοιο ώστε επηρεάζει το σήμα και να δημιουργεί απώλειες, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά το σχεδιασμό της ζεύξης [11].

Οι απώλειες αυτές θεωρούνται αμελητέες όταν εξασφαλίζεται ότι τουλάχιστον το 80% της ζώνης Fresnel είναι χωρίς εμπόδια.



Σχήμα 10: Η ακτίνα Fresnel (Fresnel Radius) [11].

2.1.2 Απώλειες λόγω βροχόπτωσης.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες ο οποίος και μας απασχολεί περισσότερο, είναι η βροχή. Απώλειες μπορούν να προκληθούν από φαινόμενα όπως η βροχή, το χιόνι, το χαλάζι και η ομίχλη, τα οποία ονομάζονται προσπτώσεις (precipitation). Παρ'όλο που μας ενδιαφέρουν οι συχνότητες άνω των 10 GHz , πρέπει να τις συμπεριλάβουμε καθώς σε υψηλότερες συχνότητες η σημαντικότητα αυξάνεται κατά πολύ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ατμόσφαιρα της Γης για αυτές τις συχνότητες γίνεται πιο «λεπτή» καθώς τα μόρια του αέρα απορροφούν την ΗΜ ακτινοβολία και αναγκάζονται να κινούνται. Έτσι, οι απώλειες αυξάνονται κι αυτές κατά πολύ. Σε μικρότερες συχνότητες δεν συναντάται αυτό το φαινόμενο. Σε μονοπάτια με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος ή γενικότερα σε ζεύξεις σε μεγάλο ύψος και μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, το υγρό χιόνι προκαλεί μεγάλες απώλειες σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων από τη βροχή. Για να υπολογίσουμε τις απώλειες λόγω βροχής ακολουθούμε την παρακάτω τεχνική:

Χρησιμοποιούμε τον παράγοντα $R_{0,01}$, δηλαδή το ρυθμό βροχόπτωσης για πάνω από 0,01% του χρόνου. Εάν ο παράγοντας αυτός δεν είναι διαθέσιμος από τοπικά στοιχεία και μετρήσεις, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις εκτιμήσεις της ITU-R P.837-7 [3]. Έπειτα, βρίσκουμε την ειδική απόσβεση γ_R για τη συχνότητα λειτουργίας, για την πόλωση και για το ρυθμό βροχόπτωσης που μας απασχολούν από τους πίνακες της ITU-R P.838-3 [14], είτε από τον Πίνακα 2 που βλέπουμε παρακάτω για ορισμένες συχνώς χρησιμοποιούμενες συχνότητες.

Κεφάλαιο 2

Η ειδική απόσβεση λόγω βροχόπτωσης αποτελεί το βασικό στοιχείο για τον υπολογισμό απωλειών λόγω βροχόπτωσης. Αναπαριστά την εξασθένιση λόγω βροχής ανα μονάδα απόστασης, γι' αυτό και η μονάδα μέτρησής της είναι το dB/km . Υπολογίζεται ως εξής:

$$\gamma_R = k \times R_{0,01}^a \quad (2.6)$$

Όπου k και a οι δύο μεταβλητές που υπολογίζουμε με την βοήθεια της ITU-R P.838-3. Στο πρότυπο αυτό, μπορούμε να δούμε τον αλγόριθμο που ακολουθούμε με συγκεκριμένες τιμές συχνοτήτων και ειδικών μεταβλητών και για συγκεκριμένες επαναλήψεις του κώδικα. Αλλιώς, μπορούμε να πάρουμε έτοιμες τις τιμές των δύο μεταβλητών k και a από τον Πίνακα 2 που βλέπουμε παρακάτω για ενδεικτικές τιμές συχνοτήτων. Τέλος, με $R_{0,01}$ συμβολίζουμε το ρυθμό βροχόπτωσης σε mm/hr .

Πίνακας 2: Ενδεικτικές τιμές σταθερών k και a [12].

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
10	0.01217	1.2571	0.01129	1.2156
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847
40	0.4431	0.8673	0.4274	0.8421
50	0.6600	0.8084	0.6472	0.7871
80	1.1704	0.7115	1.1668	0.7021
100	1.3671	0.6815	1.3680	0.6765
200	1.6378	0.6382	1.6443	0.6343
500	1.5418	0.6253	1.5366	0.6272
1 000	1.3795	0.6396	1.3822	0.6365

Έπειτα, υπολογίζουμε το ενεργό μήκος διαδρομής d_{eff} , πολλαπλασιάζοντας τον παράγοντα απόστασης r με το πραγματικό μήκος της ζεύξης. Ο παράγοντας r δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,477}R_{0,01}^{0,073a}f^{0,123} - 10,579(1 - e^{-0,024d})} \quad (2.7)$$

Όπου, f η συχνότητα σε GHz , d η πραγματική απόσταση της ζεύξης σε km και a είναι ο συντελεστής που υπολογίζουμε είτε από την ITU-R P.838-3 [14], είτε από τον Πίνακα 2, ανάλογα με την πόλωση (δείκτης $h \rightarrow$ horizontal, οριζόντια πόλωση είτε δείκτης $v \rightarrow$ vertical, κατακόρυφη πόλωση) Τέλος, μία πρόβλεψη για τις απώλειες για 0,01% του χρόνου δίνεται από τη σχέση:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R \times r \times d \text{ (σε dB)} \quad (2.8)$$

Τα παραπάνω βήματα που ακολουθούμε κάνουν χρήση ενός ρυθμού βροχόπτωσης για σταθερό ποσοστό του χρόνου. Αυτό δεν ισχύει πάντα. Ωστόσο το κάνουμε διότι υιοθετούμε μία προσεγγιστική μέθοδο. Εάν θέλουμε να εμβαθύνουμε και να υπολογίσουμε με ακρίβεια σε συγκεκριμένο ποσοστό χρόνου πέρα από το 0,01%, πρέπει να ακολουθήσουμε μία άλλη μέθοδο.

Για να υπολογίσουμε τις απώλειες σε άλλο ποσοστό του χρόνου, από 0,001% μέχρι και 1% χρησιμοποιούμε την εξίσωση 2.9:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)} \quad (2.9)$$

Εδώ, με A_p συμβολίζουμε τις απώλειες στο επιθυμητό ποσοστό χρόνου σε dB, $A_{0,01}$ είναι οι απώλειες με τη γνωστή μέθοδο για 0,01% του χρόνου, και έπειτα έχουμε τους 3 συντελεστές C_1 , C_2 , C_3 και C_0 που πρέπει να υπολογίσουμε, με βάση τις εξισώσεις 2.10α έως 2.11.

$$C_1 = (0,07^{C_0})[0,12^{(1-C_0)}] \quad (2.10\alpha)$$

$$C_2 = 0,855C_0 + 0,546(1 - C_0) \quad (2.10\beta)$$

$$C_3 = 0,139C_0 + 0,043(1 - C_0) \quad (2.10\gamma)$$

$$C_0 = \begin{cases} 0,12 + 0,4 \left[\log_{10} \left(\frac{f}{10} \right)^{0,8} \right] & f \geq 10 \text{ GHz} \\ 0,12 & f < 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (2.11)$$

Συνδιασμός βροχής και χιονιού:

Οι απώλειες που υπολογίζουμε με την εξίσωση (2.9) ισχύουν όταν υπάρχει μόνο βροχή. Ένα μονοπάτι διάδοσης μπορεί να επηρεάζεται και από πάγο ή χαλάζι, ανάλογα με το ύψος των κεραιών (μεγαλύτερο ύψος, μεγαλύτερες απώλειες). Το ίδιο ισχύει και όταν σχηματίζεται πάγος στις κεραίες, είτε στον σκελετό της κεραίας είτε στο 'πίατο' της, το κάτοπτρο λήψης.

Επίσης, σημαντικό είναι να γνωρίζουμε τον τρόπο με τον οποίο θα χειριστούμε ένα ζήτημα, όπου έχουμε γνωστές τις απώλειες για μία συγκεκριμένη συχνότητα και θέλουμε να τις υπολογίσουμε σε μία άλλη. Σε αυτή την περίπτωση, και για συχνότητες 7-50 GHz ακολουθούμε την εξίσωση:

$$A_2 = A_1 \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1} \right)^{1-H(\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3)} \quad (2.12)$$

Όπου A_2 είναι οι απώλειες στην συχνότητα όπου επιθυμούμε, A_1 οι απώλειες στη συχνότητα που γνωρίζουμε και με Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 συμβολίζουμε τις 3 εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην 2.12, οι οποίες εξαρτώνται αποκλειστικά από τη συχνότητα λειτουργίας σε GHz.

Το ίδιο ισχύει και για να υπολογίσουμε σε διαφορετική πόλωση από αυτή που έχουμε. Μπορούμε να μεταπηδήσουμε από την μία πόλωση στην άλλη (οριζόντια-κατακόρυφη) με χρήση των απλών εξισώσεων 2.13 και 2.14.

$$A_V = \frac{300A_H}{335 + A_H} (\sigma\epsilon \text{ dB}) \quad (2.13)$$

$$A_H = \frac{335A_V}{300 - A_V} (\sigma\epsilon \text{ dB}) \quad (2.14)$$

2.1.3 Πλήθος συμβάντων εξασθένισης /διάρκεια απωλειών και μεταβολή στη γωνία άφιξης/αναχώρησης.

Το πλήθος των συμβάντων που προκαλούν εξασθένιση που μετράμε, το οποίο συμβολίζουμε με $N(A)$, η μέση διάρκεια των απωλειών αυτών που ορίζεται ως $D_m(A)$, και ο συνολικός χρόνος που διαρκούν $T(A)$ σε δευτερόλεπτα, συνδέονται με τη σχέση:

$$N(A) = \frac{T(A)}{D_m(A)} \quad (2.15)$$

Ο συνολικός χρόνος $T(A)$ εξαρτάται από τη φύση του γεγονότος που μελετάμε. Για παράδειγμα, εάν μελετάμε ένα φαινόμενο που διαρκεί 2 δευτερόλεπτα, οι απώλειες που θα μετρήσουμε δεν λαμβάνονται υπόψιν λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος, ωστόσο είναι σημαντικές για να προσεγγίσουμε τον συνολικό χρόνο όπου η ζεύξη μας θα είναι ‘κάτω’, θα έχει δηλαδή απώλεια επικοινωνίας.

Αλλαγή στις γωνίες άφιξης/αναχώρησης (λήψης/αποστολής):

Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εάν υπάρξει μεταβολή του δείκτη διάθλασης του αέρα. Η μεταβολή αυτή εξαρτάται κυρίως από τη συχνότητα και εντοπίζεται σε συστήματα που χρησιμοποιούν κατακόρυφη πόλωση. Δεν έχουν παρατηρηθεί ποτέ σημαντικές μεταβολές κατά τη διάρκεια κακών καιρικών φαινομένων, ωστόσο εάν χρησιμοποιούνται κεραίες υψηλού κέρδους/στενής δέσμης HM ακτινοβολίας, ο άξονας της δέσμης μπορεί να επηρεαστεί.

Παραμόρφωση και Μείωση XPD:

Το cross-polar discrimination-XPD (σταυροπολωτική διάκριση σε ελεύθερη μετάφραση) προκαλεί co-channel interference (Διακαναλική -ανάμεσα στα κανάλια- παρεμβολή). Ουσιαστικά, μας δίνει το μέτρο αποπόλωσης, πόσο έχει αποπολωθεί το σήμα μας λόγω παρεμβολών. Μία άλλη ερμηνεία ορίζει το XPD ως μία αναλογία του σήματος στην πόλωση που επιθυμούμε προς το σήμα της αντίθετης πόλωσης. Ο λόγος που υπολογίζουμε και λαμβάνουμε υπόψιν τον παράγοντα αυτόν, είναι διότι το HM κύμα υφίσταται αποπόλωση καθώς διέρχεται από το μέσο διάδοσης. Διακρίνεται σε κατακόρυφο (Vertical) και οριζόντιο (Horizontal).

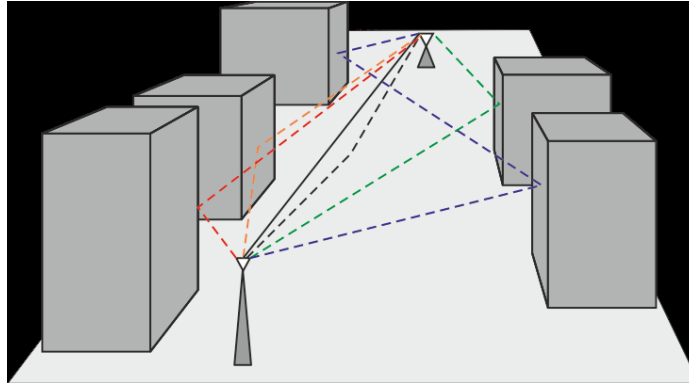
$$XPD_V = 20 \log \left(\frac{E_V}{E_H} \right) \quad (2.16)$$

$$XPD_H = 20 \log \left(\frac{E_H}{E_V} \right) \quad (2.17)$$

Όπως μπορούμε να δούμε, το XPD εξαρτάται από τις συνιστώσες της οριζόντιας (E_H) και της κατακόρυφης (E_V) πόλωσης.

Παραμόρφωση και απώλειες:

Οι βασικοί παράγοντες που προκαλούν παραμορφώσεις σε ζεύξεις των ζωνών UHF και SHF είναι η εξάρτηση του πλάτους από τη συχνότητα και οι καθυστερήσεις λόγω ελεύθερου χώρου. Σχεδιάζοντας το κανάλι διάδοσης, θεωρούμε ότι το σήμα θα ακολουθήσει πολλές πορείες μέχρι να φτάσει στο δέκτη. Αυτές είναι: η απευθείας διαδρομή (που στο σχήμα 11 φαίνεται με μαύρο χρώμα) και διάφορες ανακλάσεις (που φαίνονται στο σχήμα με διάφορα χρώματα) που θα γίνουν λόγω εδάφους.



Σχήμα 11: Πολλαπλές διαδρομές διάδοσης [8].

Εαν το σήμα που φτάνει από την απευθείας διαδρομή, είναι ένα καθυστερημένο αντίγραφο του σήματος που έφτασε από άλλη διαδρομή, θα υπάρξει διασυμβολική παρεμβολή, άρα απώλειες. Οι απώλειες αυτές παρατηρούνται όταν ο ρυθμός λαθών (BER-Bit Error Rate), περάσει μία συγκεκριμένη τιμή και έτσι δεν μπορεί να εντοπίσει σωστά τις πληροφορίες. Μπορούμε να προβλέψουμε αυτές τις απώλειες με τη χρήση τριών μοντέλων:

- ‘Υπογραφή’ συστήματος: Χρήση ενός προσομοιωτή που χρησιμοποιεί τις πληροφορίες της ζεύξης μόνο.
- Γραμμική παραμόρφωση πλάτους (LAD): Εκτιμά την κατανομή του πλάτους που αφορά 2 συγκεκριμένες συχνότητες και χρησιμοποιεί πιο λεπτομερή χαρακτηριστικά.
- Περιθώριο εξασθένισης: Χρησιμοποιεί έτοιμες στατιστικές κατανομές καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά της ζεύξης.

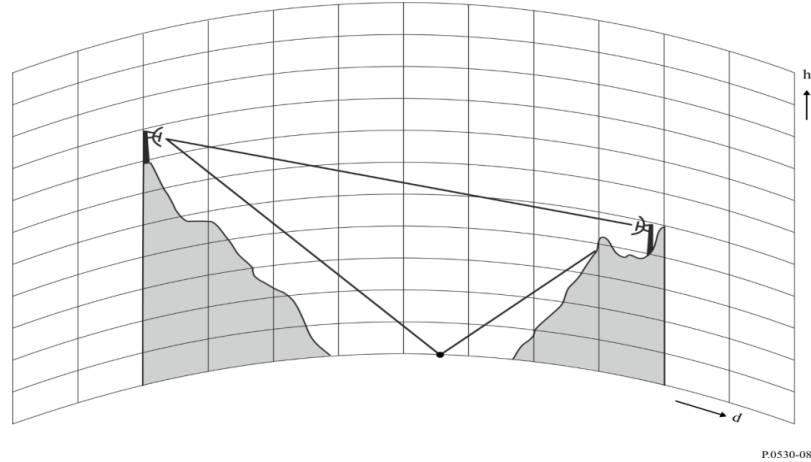
2.1.4 Τεχνικές για εξάλειψη των απωλειών λόγω πολλαπλών διαδρομών

Απώλειες οι οποίες προκαλούνται από διασπορά της δέσμης ατινοβολίας καθώς και από τις πολλαπλές διαδρομές διάδοσης (multipath) πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν ενώ σχεδιάζουμε μία ζεύξη. Υπάρχουν πολλές τεχνικές για την εξάλειψή τους, οι οποίες συνήθως αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα και τις δύο κατηγορίες απωλειών. Με τις ίδιες τεχνικές προσπαθούμε να διορθώσουμε και την μείωση του XPD, οι οποίες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το εάν χρειάζεται να αλλάξουμε κάτι στην διαδικασία εκπομπής/λήψης είτε όχι. Για οικονομικούς, κυρίως, λόγους, προτιμούμε να μην αλλάζουμε κάτι και καταφεύγουμε στην λύση που περιγράφεται πρώτη:

Χωρίς αλλαγές: Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται όταν θέλουμε να ελαττώσουμε την εξασθένιση λόγω multipath και ακολουθούν 3 βασικές αρχές- επιθυμητά αποτελέσματα: **A)** Μείωση της πιθανότητας να εμφανιστεί flat fading (εξασθένιση λόγω ατμοσφαιρικών παραγόντων που προκαλεί μεταβολές στη συχνότητα του σήματος). **B)** Μείωση της πιθανότητας να εμφανιστούν ανακλάσεις στο έδαφος. **Γ)** Μείωση καθυστερήσεων. Παρακάτω θα περιγράψουμε τις μεθόδους που ακολουθεί αυτή η τεχνική και θα αναφέρουμε σε ποιές από τις 3 βασικές αρχές έχει εφαρμογή:

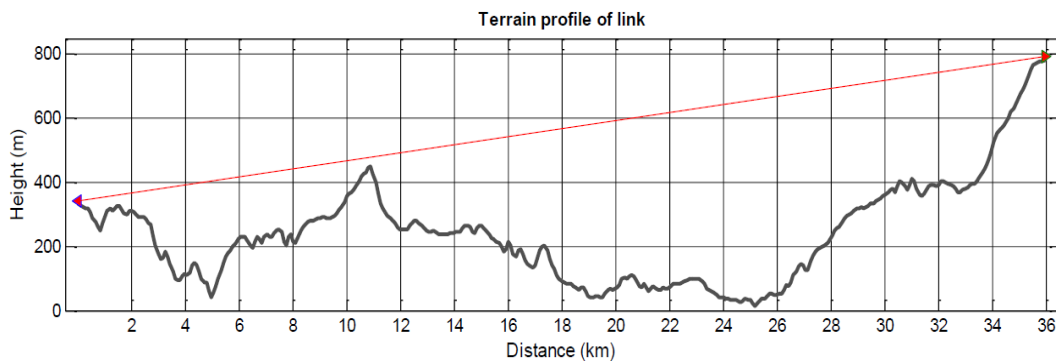
Μέθοδος 1) Άυξηση κλίσης του μονοπατιού διάδοσης: Οι ζεύξεις πρέπει να χρησιμοποιούν προς όφελός τους το έδαφος ώστε να επιτυγχάνονται τα **A)** και **B)**. Εάν επιθυμούμε να αυξήσουμε την κλίση αυτό επιτυγχάνεται με «χαμήλωμα» της μίας κεραίας.

Μέθοδος 2) Κατάλληλη επιλογή εδάφους: Προτιμάμε βουνά και πεδιάδες από την θάλασσα, καθώς και μέρη με βλάστηση όπου υπάρχουν λιγότερες ανακλάσεις. Με αυτό τον τρόπο ουσιαστικά ‘προστατεύουμε’ τη ζεύξη και τις κεραίες επιτυγχάνοντας την αρχή **B**). Καταφέρνουμε έτσι καλύτερο LOS όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου οι κεραίες έχουν οπτική επαφή αλλά δεν υπάρχουν πολλές ανακλαστικές επιφάνειες ανάμεσά τους.



Σχήμα 12: Παράδειγμα προστασίας από ανακλάσεις [9].

Μέθοδος 3) Κατάλληλη επιλογή του ύψους των κεραιών: Ορισμένες φορές τα ύψη των κεραιών μεταβάλλονται ώστε να αποφευχθούν ανακλαστικά κύματα και να μην επηρεάσουν τις τιμές k και a που εξαρτώνται άμεσα. Ακολουθώντας συγκεκριμένα βήματα που περιγράφονται εντός της ITU-R P.837 και χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο που έχει οριστεί, επιλέγουμε τα κατάλληλα ύψη για τις κεραίες εκπομπής και λήψης. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 13, εχώ έχουμε πολλές ανακλαστικές επιφάνειες (βουνό, λόφους και χαράδρες), η κατάλληλη επιλογή των υψών των κεραιών επιτυγχάνει την επικοινωνία ανάμεσα στους δύο σταθμούς:



Σχήμα 13: Έδαφος με ανακλαστικές επιφάνειες [8].

Μέθοδος 4) Επιλογή κατακόρυφης πόλωσης: Σε μονοπάτια πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και σε συχνότητες άνω των 3 GHz, είναι προς όφελός μας να επιλέξουμε κατακόρυφη πόλωση αντί για οριζόντια, καθώς μπορούμε να κερδίσουμε από 3 έως 17 dB λόγω μικρότερης ανάκλασης.

Με αλλαγές: Περιλαμβάνουν μεταβολές στον χώρο, τη γωνία και την συχνότητα. Έτσι έχουμε καλύτερη διαχείριση του εύρους συχνοτήτων και μείωση απωλειών λόγω εξασθένισης της δέσμης ακτινοβολίας. Αποτελούν σύνθετες, προχωρημένες και ακριβές τεχνικές, γι' αυτό και προτιμούμε τις τεχνικές χωρίς αλλαγές. Εισάγουμε την έννοια του **παράγοντα βελτίωσης (Improvement factor)**, ο

οποίος εξαρτάται από ποσοστό του χρόνου όπου οι απώλειες είναι ίσες με αυτές που εμφανίζονται στις τεχνικές χωρίς αλλαγές($p(A)$) και από το αντίστοιχο ποσοστό στις τεχνικές με αλλαγές ($p_d(A)$). Είναι ουσιαστικά ένα μέτρο σύγκρισης των δύο τεχνικών:

$$I = \frac{p(A)}{p_d(A)} \quad (2.18)$$

Αυτές οι τεχνικές με αλλαγές είναι:

- Χώρος ανάμεσα στις κεραίες: Ρυθμίζεται έτσι ώστε να επιτύχουμε να είναι καθαρός ο χώρος μπροστά στην χαμηλότερη κεραία, να έχουμε ένα καλό παράγοντα βελτίωσης και να μειώσουμε την πιθανότητα να χαθεί η επικοινωνία ανάμεσα στις δύο κεραίες εάν η μία εξασθενίσει.
- Μεταβολές στις γωνίες εκπομπής/ λήψης: Μία περίπλοκη διαδικασία που ακολουθείται για βελτίωση και ενίσχυση της αποκρίσης του συστήματος.

2.2 Το μοντέλο Mourofouma

Το μοντέλο Mourofouma [12] παρουσιάζεται και προτείνεται από τον Καναδό Δρ. Mourofouma τον Ιανουάριο του 2009, και εκδίδεται στο περιοδικό της IEEE τον Μάρτιο του ίδιου έτους.

Λόγω αυξημένου ενδιαφέροντος για τις ράδιο-τηλεπικοινωνίες των ζωνών SHF και EHF, οι απώλειες λόγω βροχής αποτελούν μείζον πρόβλημα για τους μηχανικούς και τους σχεδιαστές ζεύξεων. Απαραίτητη είναι η εύρεση ενός κατάλληλου μοντέλου που θα προβλέπει αυτές τις απώλειες και για επίγειες και για δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις. Ενώ έχουν γίνει πολλά βήματα προόδου, έχουμε πολλή δουλειά μπροστά μας ακόμη. Οι απώλειες που μετράμε, για ένα μεγάλο ποσοστό του χρόνου, δεν εξαρτώνται αποκλειστικά και μόνο από την απορρόφηση και διασπορά των σταγόνων της βροχής, αλλά και από το γεγονός ότι οι κεραίες των σταθμών παραμένουν βρεγμένες για ένα επιπλέον χρονικό διάστημα μετά το τέλος της βροχής. Σε αυτό το μοντέλο, η πρόβλεψη των απωλειών βασίζεται στην ένταση της βροχόπτωσης που συμβολίζεται με R_{001} (mm/hr), η οποία ξεπερνά το 0,01% του χρόνου, καθώς και από τον καθορισμό του ποσοστού του χρόνου όπου οι απώλειες που θέλουμε να μελετήσουμε ξεπερνούν το παραπάνω όριο. Για μικρά ποσοστά του χρόνου, οι απώλειες που μετράμε προκαλούνται από τη βροχή. Για μεγαλύτερα ποσοστά, ακόμη και το νερό που απομένει στο κάτωτο της κεραίας προκαλεί μεγαλύτερο πρόβλημα (όπως είδαμε στην ενότητα 2.1.2 αντίστοιχα για τον πάγο). Το μοντέλο αυτό, σύμφωνα με τον Δρ. Mourofouma διαφέρει από τα άλλα, διότι μπορεί να προβλέψει τις απώλειες που εξαρτώνται και από το ρυθμό βροχής, και από οποιοδήποτε ποσοστό του χρόνου μας ζητηθεί.

2.2.1 Βροχή και απώλειες

Για να περιγράψουμε το μοντέλο αυτό, ορίζουμε το μέγεθος A_{001} (dB) ως τις απώλειες βροχής που προκαλούνται από τον ρυθμό βροχόπτωσης R_{001} (mm/hr), για πάνω από 1% του χρόνου. Χρησιμοποιείται η σχέση της μορφής kR_p^a . Η ειδική απόσβεση $\gamma_{R_{001}}$, με χρήση του ρυθμού βροχής R_{001} (mm/hr) και για πάνω από 0,01% του χρόνου δίνεται από τη σχέση (2.17). Όπως είπαμε παραπάνω εξαιτίας των διαφορετικών ειδών βροχής, κάνουμε χρήση ενός ισοδύναμου μονοπατιού διάδοσης όπου θεωρούμε ότι έχουμε σταθερή βροχή, αντί να χρησιμοποιήσουμε το πραγματικό μήκος της ζεύξης, το οποίο ονομάζουμε L_{eq} . Έτσι, οι απώλειες $A_{0,01}$ (dB) δίνονται από τη σχέση 2.20:

$$\gamma_{R_{001}} = kR_{0,01}^a \quad (2.19)$$

$$A_{0,01} = \gamma_{R_{001}} \times L_{eq} \quad (2.20)$$

2.2.2 Ισοδύναμο μονοπάτι διάδοσης για επίγειες ζεύξεις και παράγοντας $\zeta(L)$

Κάθε επίγεια μικροκυματική ζεύξη χαρακτηρίζεται από το πραγματικό μήκος της L που αναφέρεται στην απόσταση ανάμεσα στις δύο κεραίες. Για να ορίσουμε το ισοδύναμο μονοπάτι διάδοσης, ένας παράγοντας προσαρμογής δ που καθιστά τη βροχή σταθερή, είναι απαραίτητος. Έτσι, έχουμε την εξίσωση (2.21)

$$L_{eq} = \delta \times L \quad (2.21)$$

με δ να είναι ο παράγοντας προσαρμογής και L το πραγματικό μήκος ζεύξης σε km .

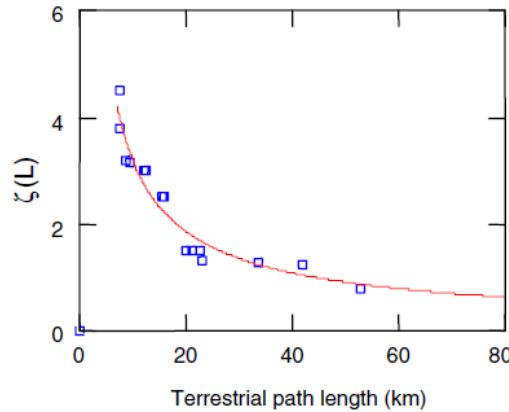
Για τον παράγοντα προσαρμογής δ έχουμε την παρακάτω φόρμουλα που κάνει χρήση του ρυθμού βροχής R_{001} και ενός επιπλέον παράγοντα $\zeta(L)$:

$$\delta(R_{001}, L) = e^{\frac{-R_{001}}{1+\zeta(L) \times R_{001}}} \quad (2.22)$$

Ο παράγοντας $\zeta(L)$ δεν εξαρτάται ούτε από τη συχνότητα και το ρυθμό βροχόπτωσης. Στην εξίσωση (2.23) φαίνεται ότι εξαρτάται μόνο από το πραγματικό μήκος της ζεύξης. Έτσι, διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις για την ακριβή τιμή του, ανάλογα με το εάν το μήκος είναι πάνω ή κάτω από $7 km$:

$$\zeta(L) = \begin{cases} -100 & L \leq 7 km \\ \left[\frac{44,2}{L}\right]^{0,78} & L > 7 km \end{cases} \quad (2.23)$$

Η σχέση ανάμεσα στον παράγοντα $\zeta(L)$ – συγκεκριμένα του τμήματος $\left[\frac{44,2}{L}\right]^{0,78}$ - και στο πραγματικό μήκος της ζεύξης σε φαίνεται στο Σχήμα 14. Με **μπλέ** χρώμα φαίνονται τα πειραματικά δεδομένα που μετρήθηκαν σε πραγματικές ζεύξεις με συγκεκριμένες συχνότητες λειτουργίας και πολώσεις κεραιών, ενώ με **κόκκινο** βλέπουμε τη θεωρητική καμπύλη:



Σχήμα 14: Σύγκριση πραγματικών δεδομένων και εξίσωσης (2.22) [12].

Μια επισήμανση που περιλαμβάνεται στο μοντέλο που μελετάμε σε αυτή την ενότητα, θεωρεί ότι εάν η βροχή σταματήσει, το ισοδύναμο μονοπάτι L_{eq} γίνεται ίσο με το πραγματικό μήκος L . Στην περίπτωση όπου έχουμε ένα πολύ μεγάλο ρυθμό βροχής και καλύπτεται ουσιαστικά όλο το μήκος της επίγειας ζεύξης, ο παράγοντας $\zeta(L)$ θα πάρει την τιμή -100 , όπως ισχύει για $L \leq 7 km$. Τελικά, μήκος του ισοδύναμου μονοπατιού, αφού επιλέξουμε την κατάλληλη τιμή του παράγοντα, με τον επιθυμητό ρυθμό βροχής $R_{001}(mm/hr)$ και με το πραγματικό μήκος L , δίνεται από τη σχέση:

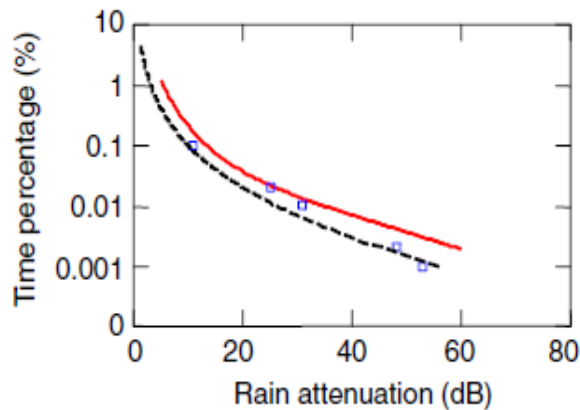
$$L_{eq} = L \times e^{\frac{-R_{001}}{1+\zeta(L) \times R_{001}}} \quad (2.24)$$

2.2.3 Σύγκριση με ITU

Τα μοντέλα πρόβλεψης που υπάρχουν στη βιβλιογραφία προβλέπουν τις απώλειες που σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο ρυθμό βροχόπτωσης και για ένα συγκεκριμένο ποσοστό του χρόνου. Το παρόν μοντέλο προβλέπει για ποιο ποσοστό του χρόνου οι απώλειες ξεπερνούν έναν αριθμό, δηλαδή για πόσες ώρες και ημέρες ενός χρόνου έχουμε κακή ποιότητα επικοινωνίας στη ζεύξη μας.

Η κόκκινη γραμμή μας δείχνει την τιμή του $\zeta(L)$ για $L > 7 \text{ km}$ με βάση τον τύπο $\left[\frac{44,2}{L}\right]^{0,78}$ και είναι θεωρητική καμπύλη. Τα μπλέ σημεία αφορούν πραγματικές μετρήσεις που έγιναν σε πολλές περιοχές του κόσμου, έτσι βλέπουμε την σύγκριση ανάμεσα στα δύο. Στον οριζόντιο άξονα βλέπουμε το μήκος ζεύξης και στον κατακόρυφο την τιμή του παράγοντα.

Μία τελική σύγκριση ανάμεσα στο συγκεκριμένο μοντέλο (κόκκινη καμπύλη), στο μοντέλο της ITU (μαύρη διακεκομμένη) και τα πραγματικά δεδομένα (μπλέ σημεία) μπορούμε να δούμε παρακάτω. Στον οριζόντιο άξονα βλέπουμε τις απώλειες σε dB σε συνάρτηση με το ποσοστό του χρόνου όπου παρουσιάζονται. Τελικά, μία σύγκριση ανάμεσα στα δύο μοντέλα που προαναφέραμε φαίνεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15: Σύγκριση ITU και Moupfouma [12].

2.3 Το μοντέλο Silva Mello

Προτάθηκε από τον Βραζιλιάνο Δρ. Luiz da Silva Mello το 2011 και εκδίδεται στο αναγνωρισμένο περιοδικό Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications [13] τον Ιούνιο του 2012. Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται μία ημι-εμπειρική μέθοδος πρόβλεψης των απωλειών λόγω βροχόπτωσης, ίδια με αυτή που χρησιμοποιεί η ITU σαν βάση για το δικό της μοντέλο. Επιπροσθέτως, προστέθηκε η ιδέα ενός πραγματικού ρυθμού βροχής. Αυτό αναπαριστά τον πραγματικό όγκο νερού κατα τη διάρκεια μίας βροχόπτωσης και βοηθά στο να χρησιμοποιηθεί όλο το εύρος της κατανομής βροχόπτωσης για την καλύτερη πρόβλεψη των απωλειών. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της ITU, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στα αποτελέσματα με τη χρήση του μοντέλου Silva-Mello, έναντι του δικού της μοντέλου.

2.3.1 Περιγραφή του μοντέλου

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου της ITU, είναι ότι η εξασθένηση προβλέπεται χρησιμοποιώντας μόνο τον ρυθμό βροχόπτωσης που υπερβαίνει το 0,01% του χρόνου. Για άλλα ποσοστά χρόνου, η εξασθένηση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση παρέκτασης. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος θα παρέχει τα ίδια αποτελέσματα για δύο διαφορετικά μέρη που έχουν τον ίδιο ρυθμό βροχόπτωσης, ανεξάρτητα από το αν οι κατανομές ρυθμών βροχόπτωσης συμπίπτουν μόνο σε αυτό το σημείο και όχι για άλλα χρονικά ποσοστά. Ένας άλλος σημαντικός περιορισμός είναι ότι, όταν ελέγχεται με βάση τα νέα πειραματικά δεδομένα, η μέθοδος επίγειας πρόβλεψης δείχνει σημαντική υποεκτίμηση των μετρούμενων απωλειών.

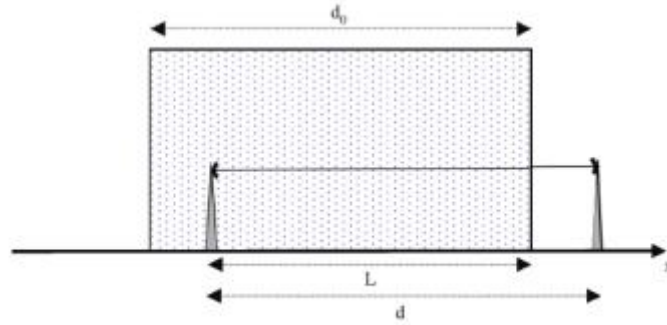
Οι απώλειες από βροχή είναι πολύ σημαντικές σε ζεύξεις άνω των 10 GHz, για τους λόγους που είδαμε στην ενότητα 1.1. Οι σταγόνες συμπεριφέρονται σαν διηλεκτρικό, δηλαδή ως μέσο αντίστασης και εμπόδιο για το σήμα, κατα μήκος της διαδρομής. Η ειδική απόσβεση $\gamma_R (dB/km)$ για μία συγκεκριμένη συχνότητα δίνεται από υπολογισμούς που κάναμε παραπάνω. Εξαιτίας των μη σφαιρικών σταγόνων, τα κύματα που είναι πολωμένα οριζόντια εμφανίζουν μεγαλύτερες απώλειες από αυτά που είναι πολωμένα κατακόρυφα.

2.3.2 Χρήση του μοντέλου ITU-R P.530-13

Η βασική υπόθεση αυτού του μοντέλου του οποίου γίνεται χρήση (που αποτελεί μία προηγούμενη έκδοση του ITU-R P.530-18 [9]), είναι ότι ένα ισοδύναμο μοντέλο ομοιόμορφης βροχόπτωσης διαμέτρου d_0 μπορεί να αντικαταστήσει επαρκώς την τυχαιότητα κάθε είδους βροχής. Το δραστικό μήκος της διαδρομής d_{eff} με d να είναι το μήκος της ζεύξης είναι:

$$d_{eff} = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \times d \quad (\sigma \epsilon \text{ m}) \quad (2.25)$$

Στην παρακάτω εικόνα παρακάτω μπορούμε να κάνουμε μία διάκριση ανάμεσα στα μεγέθη που συμμετέχουν στην εξίσωση, ώστε να έχουμε μία πιο σαφή εικόνα για το τι συζητάμε. Το μέγεθος d_0 εκφράζει τη διάμετρο του ισοδύναμου μοντέλου και προέρχεται από πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 16: Διάμετρος ισοδύναμου μοντέλου d_0 [13].

Τελικά, για το δραστικό αυτό μήκος διαδρομής, ακολουθώντας την μορφή των εξισώσεων (2.19)-(2.20) έχουμε ότι οι απώλειες είναι τελικά:

$$A_{0,01} = \gamma_{0,01} \times d_{eff} = k(R_{0,01})^\alpha \times \frac{d}{1 + \frac{d}{d_0} (R_{0,01})} \quad (2.26)$$

Με την ειδική απόσβεση $\gamma_{0,01}$ (dB/km) να είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιούμε στα παραπάνω μοντέλα και στην εξίσωση (2.19) και d_{eff} (km) το δραστικό μήκος διαδρομής που υπολογίσαμε στην (2.25).

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες προσαρμογής του μοντέλου της ITU για να βελτιωθεί η ακρίβειά του. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουν οι επιστήμονες είναι ότι προκειμένου να γίνει αυτό, χρειάζεται να επαναπροσδιοριστεί όλο το μοντέλο με βάση νεότερα δεδομένα. Αυτό απαιτεί την χρήση ενός δραστικού μήκους διαδρομής d_{eff} το οποίο είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό μήκος της ζεύξης. Ωστόσο, αυτό δεν μπορεί να γίνει στην πραγματικότητα με βάση το σχήμα 16. Έτσι φτάνουμε στον ορισμό του παράγοντα μείωσης:

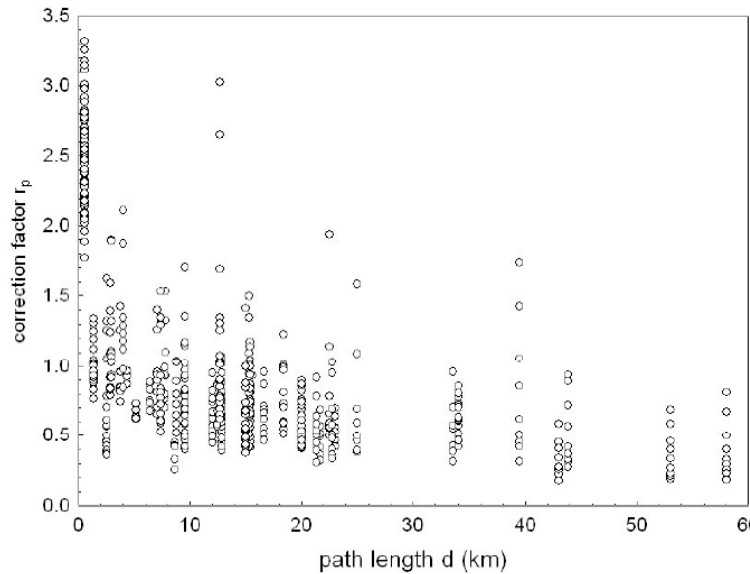
$$r = \frac{d_{eff}}{d_0} \quad (2.27)$$

2.3.3 Μέθοδος Silva Mello

Σε αυτή τη μέθοδο προτείνεται μία άλλη προσέγγιση, ωστόσο παραμένει ο παράγοντας d_{eff} που είναι και η βάση της. Αρχικά μελετήθηκε το πόσο εξαρτάται ο παράγοντας μείωσης r από τα χαρακτηριστικά της ζεύξης, χρησιμοποιώντας δεδομένα από μία μελέτη του ρυθμού βροχόπτωσης που διήρκησε μεγάλο χρονικό διάστημα. Προκειμένου να γενικεύσουμε την ανάλυση, προτείνεται ένας παράγοντας διόρθωσης r_p , όχι μόνο για το 0,01% του χρόνου, αλλά για κάθε ποσοστό:

$$r_p = \frac{A_p}{k(R_p)^\alpha \times d} \quad (2.28)$$

Με A_p και R_p να είναι οι απώλειες και ο ρυθμός βροχόπτωσης αντίστοιχα για οποιοδήποτε ποσοστό του χρόνου. Βρέθηκε ότι ο παράγοντας διόρθωσης μειώνεται, όσο μεγαλώνει η απόσταση, όπως φαίνεται στο σχήμα 17:



Σχήμα 17: Παράγοντας διόρθωσης σε σχέση με την απόσταση ζεύξης [13]

Για να αποφύγουμε ασάφειες και ανακρίβειες, σε αυτό το μοντέλο εισάγεται ο δραστικός ρυθμός βροχόπτωσης. Αυτός εξαρτάται από τον πραγματικό ρυθμό βροχόπτωσης και από το μήκος της ζεύξης. Απαραίτητο για να κατανοήσουμε το νόημα του όρου R_{eff} είναι να δώσουμε έναν ορισμό.

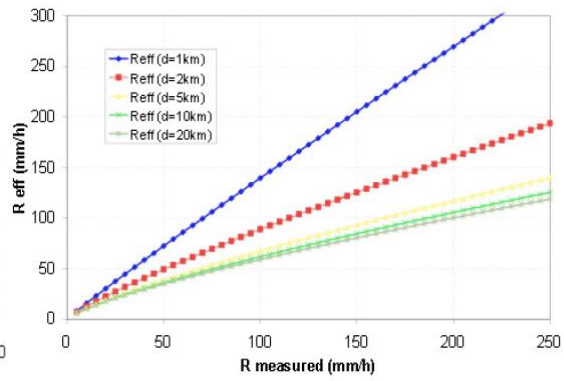
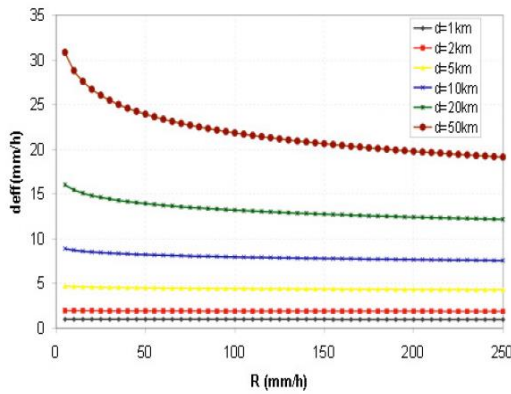
Δραστικός/Αποτελεσματικός ρυθμός βροχόπτωσης R_{eff} , είναι η διαφορά μεταξύ της συνολικής βροχόπτωσης και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (όλες οι μορφές εξάτμισης συν τη διαπνοή των φυτών). Ουσιαστικά αποτελεί τον ρυθμό βροχής που επηρεάζει πραγματικά την ζεύξη, γι αυτό και τον αποκαλούμε ενεργό.

Με βάση όλα τα παραπάνω, καταλήγουμε στις εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο. Οι εξισώσεις (2.29) έως (2.31) αφορούν τον δραστικό ρυθμό βροχής R_{eff} , το d_0 είναι η ισοδύναμη απόσταση και R_p, R ο πραγματικός ρυθμός βροχής. Καταλήγουμε στις παρακάτω εξισώσεις:

$$R_{eff} = 1,763R_p^{0,753 + \frac{0,917}{d}} \text{ σε } \frac{mm}{hr} \quad (2.29)$$

$$d_0 = 119R^{-0,244} \text{ σε } m \quad (2.30)$$

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά του δραστικού/ενεργού αυτού ρυθμού βροχόπτωσης κατα μήκος της ζεύξης σε σύγκριση με τον πραγματικό ρυθμό βροχής, μπορούμε να δούμε το Σχήμα 18. Στο Σχήμα 19 που ακολουθεί, βλέπουμε την συμπεριφορά του άλλου παράγοντα που εισάγει αυτό το μοντέλο, του d_{eff} , σε σχέση με τον πραγματικό ρυθμό.



Σχήμα 18: R_{eff} και πραγματικός ρυθμός βροχής [13] Σχήμα 19: d_{eff} και πραγματικός ρυθμός βροχής[13]

Και τα δύο παραπάνω σχήματα μας βοηθούν να εμπεδώσουμε την σχέση ανάμεσα στα πραγματικά μεγέθη που μετράμε πειραματικά, και στα θεωρητικά που εισάγει και χρησιμοποιεί ο Βραζιλιάνος καθηγητής που πρότεινε και το μοντέλο. Και για τα δύο, παρατηρήθηκε ότι μία κατανομή δύναμης (power law) είναι καλύτερη από μία εκθετική κατανομή (exponential law) την οποία χρησιμοποιεί η ITU.

Τελικά, για τον υπολογισμό των απωλειών με χρήση του μοντέλου Silva Mello, για οποιοδήποτε ποσοστό του χρόνου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την σχέση:

$$A_p = k R_{eff}^\alpha \times d_{eff} = k \left[1,763 R_p^{0,753 + \frac{0,917}{d}} \right]^\alpha \times \frac{d}{1 + \frac{d}{119 R_p^{-0,244}}} \quad (2.31)$$

Όπου k και α οι γνωστές από την προηγούμενη ενότητα σταθερές, $R_p(mm/hr)$ ο πραγματικός ρυθμός βροχής και $d(km)$ η πραγματική απόσταση της ζεύξης.

Η προτεινόμενη μέθοδος δοκιμάστηκε έναντι της ITU και άλλων μεθόδων που έχουν κατα καιρούς προταθεί στην διεθνή βιβλιογραφία, κάνοντας χρήση των μεταβλητών ελέγχου της ITU. Αυτές οι μεταβλητές προκύπτουν αφού υπολογίσουμε τον φυσικό λογάριθμο της διαίρεσης μεταξύ της θεωρητικής τιμής που αναμένουμε και της πραγματικής που μετρήσαμε. Η αποδοχή κάθε μεθόδου κρίνεται από τα αποτελέσματα που προφέρει η ίδια και την αποκλιση που εμφανίζουν οι τιμές της από τις μεταβλητές ελέγχου.

Για το συγκεκριμένο μοντέλο, έγινε χρήση διαφόρων μετρήσεων βροχόπτωσης οι οποίες αναλύθηκαν με ενσωμάτωση ενός λεπτού, και δεδομένα απωλειών που χρησιμοποιήθηκαν και από την ITU. Εντός του άρθρου μπορούμε δούμε μία σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου, της ITU και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην Αυστραλία, την Κίνα και το Ηνωμένο Βασίλειο.

Τα αποτελέσματα των ελέγχων για τις επίγειες τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις έδειξαν ότι αυτή η μέθοδος προσφέρει μεγάλη βελτίωση σε σχέση με το μοντέλο της ITU. Παρόμοια αποτελέσματα προσφέρει μόνο η μέθοδος της Κίνας η οποία χρησιμοποιεί μία μόνο τιμή του ρυθμού βροχής για να προβλέψει τις απώλειες. Ίδια συμπεράσματα προέκυψαν και κατά την διάρκεια ελέγχου δορυφορικών

ζεύξεων, όμως σε πολύ μικρότερα ποσοστά του χρόνου. Εμφανίστηκε και πάλι βελτίωση σε σχέση με το ITU-R.P 530-18 αλλά για χρονικά διαστήματα της τάξης του 0,03-0,1% όλες οι μέθοδοι προσφέρουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα.

Συνοψίζοντας, η νέα μέθοδος είναι παρόμοια με τις υπόλοιπες είναι ωστόσο κάνει χρήση όλης της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης. Η ιδέα της ισοδύναμης κυψέλης βροχής που εμείς συνολικά ορίσαμε ως R_{eff} παραμένει ως βάση και η συχνότητα λειτουργίας εξακολουθεί να επηρεάζει μόνο τους παράγοντες k και a , όπως άλλωστε αναμέναμε λόγω φυσικής τους σημασίας. Τελικά η μέθοδος αυτή είναι μία πολύ βελτιωμένη εκδοχή της ITU-R P.530-18 για την πρόβλεψη απωλειών ενώ προσφέρει και πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια για μικρότερα ποσοστά του χρόνου σε σχέση με όλες τις άλλες μεθόδους.

2.4 Το μοντέλο Singh

Το μοντέλο αυτό προτείνεται από τον Ινδό καθηγητή Hitesh Singh και τους συνεργάτες του, το 2020 και επανεκδίδεται με ορισμένες διορθώσεις το 2021. Αποτελεί τμήμα ενός ευρύτερου συγγραφικού έργου με όνομα Wireless Personal Communications [15] και εκδίδεται ξεχωριστά ως αυτόνομο μοντέλο από την Springer το ίδιο έτος.

Οι απώλειες των ραδιοκυμάτων προκαλούνται γενικά από την απορρόφηση του σήματος από ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως η βροχή, το χαλάζι, το χιόνι, τα σύννεφα κλπ. Η βροχή δεν επηρεάζει μόνο τις δορυφορικές ζεύξεις αλλά και τις επίγειες point-to-point ζεύξεις (σταθμός εκπομπής σε σταθμό λήψης και αντίστροφα). Σε αυτό το μοντέλο θα μελετήσουμε την δουλειά των ερευνητών σε πολλά σημεία του κόσμου που ασχολήθηκαν με πολλές και διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας (πάντα πάνω από 10 GHz). Έπειτα θα δούμε τη μαθηματική σχέση πίσω από αυτή την έρευνα και έπειτα θα χρησιμοποιήσουμε τις φόρμουλες που αναπτύχθηκαν ώστε να υπολογίσουμε τις απώλειες. Μία σύγκριση, όπως και στο τέλος κάθε ενότητας άλλωστε, θα ακολουθήσει ώστε να έχουμε μία πιο πλήρη εικόνα των αποτελεσμάτων και της χρηστικότητας του μοντέλου. Το συγκεκριμένο αποτελεί ίσως το πιο 'εύκολο' στην εφαρμογή του από τα άλλα 3 που προαναφέραμε διότι απαιτεί στην πραγματικότητα 5 απλές μαθηματικές πράξεις, όπως θα δούμε παρακάτω.

Πολλά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη απωλειών, δείχνουν ότι η κατανομή της βροχής είναι ανομοιογενής κατα μήκος των ζεύξεων που οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες σε υψηλότερες συχνότητες. Οι πιο έντονες και πυκνές βροχοπτώσεις συναντώνται σε μικρότερες περιοχές και είναι πιο σύντομες σε σχέση με τις αραιότερες. Μία μικρή αναφορά, χωρίς πολλές λεπτομέρειες, σε μοντέλα πρόβλεψης που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ευρέως και στην γενική ιδέα των οποίων στηρίχθηκε ο συγγραφέας είναι αυτά που φαίνονται παρακάτω:

2.4.1 Μοντέλα πρόβλεψης, σύγκριση και απώλειες από βροχή

Μοντέλο ITU

Παραπάνω, στην ενότητα 2.1, μιλήσαμε για το μοντέλο ITU-R P.530-18 που είναι το βασικό, το αρτιότερο και το πιο γνωστό μοντέλο πρόβλεψης. Εντός της μελέτης του Δρ. Singh, βλέπουμε μία αναφορά στο μοντέλο ITU-R P.618-8 [16] το οποίο μας περιγράφει την πρόβλεψη των απωλειών στις δορυφορικές επικοινωνίες. Κάνει χρήση τριών εξισώσεων, τις οποίες θα αναφέρουμε στην (2.32) καθώς δεν θα μας απασχολήσουν περαιτέρω:

$$A_{tt0,01} = k \times R^\alpha \times d \times r \quad (\sigma\epsilon \text{ dB}) \quad r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad d_0 = 35e^{-0,015R} \quad (\sigma\epsilon \text{ km}) \quad (2.32)$$

Όπου με $R(mm/hr)$ συμβολίζουμε το ρυθμό βροχής όπως συνήθως, k και α οι σταθερές που χρησιμοποιούμε και πιο πάνω, και d, d_0 τα δύο μήκη που χρησιμοποιεί η ITU όπως τα είδαμε στην υποενότητα 2.3.2.

Το μοντέλο ITU-R P.618-8 δεν είναι το ίδιο με το μοντέλο ITU-R P.530-18 της ενότητας 2.1, αλλά χρησιμοποιεί τους ίδιους όρους, γι' αυτό και δεν θεωρείται ωφέλιμο να τους αναλύσουμε ξανά. Για περαιτέρω πληροφορίες μπορούμε να ανατρέξουμε στην ενότητα 2.1 και την υποενότητα 2.3.2.

Μοντέλο Garcia-Lopez

Μία απλή μέθοδος χρησιμοποιήθηκε από τους Garcia και Lopez [16], οι οποίοι εισήγαγαν νέες παραμέτρους. Με αυτήν μπορούν να υπολογιστεί η τιμή των απωλειών με χρήση διαφορετικών μεταβλητών για τροπικά κλίματα:

$$A = \frac{kR^\alpha L_s}{\left[a + \left\{ \frac{L_s(bR + cL_s + d)}{e} \right\} \right]} \quad (2.33)$$

Όπου R, k, α είναι οι γνωστές μας σταθερές, L_s (σε km) είναι το μήκος της λοξής διαδρομής (διαδρομής ζεύξης που δεν είναι απολυτή, θεωρητικά, ευθεία. Ένα 'λοξό' LOS μπορούμε να πούμε, χάριν κατανόησης). Οι τιμές των σταθερών a, b, c, d, e του παρονομαστή δίνονται από το μοντέλο, με τις τιμές τους συνήθως να είναι $a = 0.7$, $b = 18.35$, $c = -16.51$, $d = 500$ και $e = 10^4$.

Μοντέλο Brazil

Αναφορά γίνεται στο μοντέλο Silva-Melo που περιγράψαμε στην ενότητα 2.3, το οποίο ο συγγραφέας καθώς και η επιστημονική κοινότητα, το ορίζουν συχνά ως μοντέλο Brazil [16] και έχουμε:

$$A_p = k \left[1,763 R_p^{0,753 + \frac{0,917}{d}} \right]^\alpha \times \frac{d}{1 + \frac{d}{119 R_p^{-0,244}}} \quad (2.34)$$

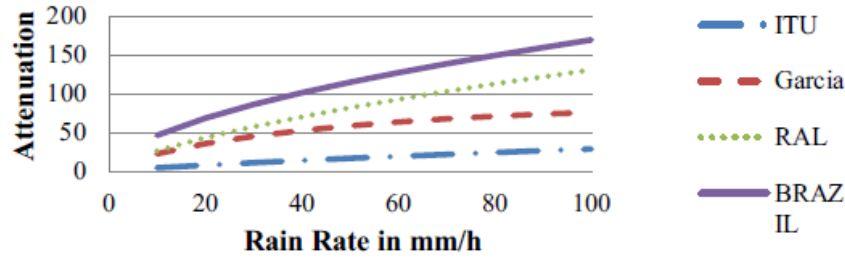
Μοντέλο RAL

Προτάθηκε από το Rutherford Appleton Laboratory (RAL) [16] με σκοπό να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο για να αναπαραστήσουμε τον αριθμό των γεγονότων για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπου η βροχή προκαλεί απώλειες που ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα διάρκειας τριών ετών, το πείραμα έλαβε χώρα στο Chilbolton του Hampshire και λάμβανε δείγματα ανα δέκα δευτερόλεπτα. Με αυτόν τον τρόπο, τις απώλειες μπορούμε να τις υπολογίσουμε με τις δύο εξισώσεις που πάλι λόγω μη σημαντικότητας στη μελέτη μας στη δεδομένη χρονική στιγμή, θα τις αναφέρουμε μαζί στην (2.35):

$$A = kR^a dr \quad \text{και} \quad r = \frac{1}{0,874 + 0,0255(R^{0,34} - 1,7)d^{0,7}} \quad (2.35)$$

Εδώ μπορούμε να δούμε ότι d είναι η απόσταση της ζεύξης σε km, r είναι ο παράγοντας μείωσης τον τον οποίο είδαμε στην εξίσωση (2.27), και A είναι οι απώλειες σε dB.

Μία τελική σύγκριση ανάμεσα στα παραπάνω μοντέλα, όπου μπορούμε να δούμε με ακρίβεια πως ο ρυθμός βροχόπτωσης επηρεάζει τις απώλειες φαίνεται στο σχήμα 20:



Σχήμα 20: Σύγκριση μοντέλων [16].

Απώλειες από βροχή:

Η έρευνα του Ulaganathen [16] περιγράφει τις μελέτες γύρω από πολλά μοντέλα πρόβλεψης, κυρίως για τροπικά κλίματα. Μετά από πειράματα, η έρευνα αυτή αποδείχθηκε χρήσιμη για τους μηχανικούς για όλες τις τροπικές ζώνες, δηλαδή γενικεύθηκε. Έπειτα παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο της ITU υποτιμά τον αριθμό των απωλειών σε ζεύξεις αρκετά υψηλών συχνοτήτων, δηλαδή μετρήθηκαν πειραματικά πολύ μεγαλύτερες τιμές από αυτές που αναμενόταν. Άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη Λιθουανία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ειδική απόσβεση που προκαλείται από τη βροχή σε πραγματικές συνθήκες είναι μέχρι και δύο φορές μεγαλύτερη από αυτήν που προβλέπει το μοντέλο ITU-R P.530-18. Μία άλλη αναλυτική μελέτη έλαβε χώρα στο πανεπιστήμιο του Αϊντχόφεν στην Ολλανδία, με δεδομένα που συνέλεξε ο δορυφόρος Olympus Max van de Kamp. Αυτή καταλήγει ότι η τυπική αποκλιση εξαρτάται από το είδος της βροχόπτωσης, ότι δεν είναι δηλαδή ίδια για όλες τις μετρήσεις [16].

2.4.2 Παραμετροποίηση του μοντέλου

Παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο βροχής της ITU είναι περίπλοκο και εξαρτάται αποκλειστικά από την συμπεριφορά των συντελεστών k και a , που με τη σειρά τους εξαρτώνται από τη συχνότητα, γεγονός που τους καθιστά δύσκολους να υπολογιστούν με ακρίβεια. Προκειμένου να υπολογιστούν οι απώλειες λόγω βροχής, χρησιμοποιείται ένα μαθηματικό μοντέλο (**RWAR-Radio Wave Attenuation due to Rain**). Εφαρμόζεται για οριζόντια πόλωση καθώς και για κατακόρυφη. Το μοντέλο αυτό σχεδιάζεται με τα εξής βήματα:

Για συχνότητες 1-100 GHz, η ειδική απόσβεση γ_R (dB/km) υπολογίζεται με βάση το μοντέλο της ITU. Έπειτα, μετά από χρήση των διαγραμμάτων συχνότητας-ειδικής απόσβεσης, για διαφορετικούς ρυθμούς βροχής και για τα δύο είδη πόλωσης που μας ενδιαφέρουν, φτάνουμε τελικά στην γενική μορφή για τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης σε οποιαδήποτε περίπτωση, η οποία είναι:

$$A \left(\frac{dB}{km} \right) = af^3 + bf^2 + cf + d \quad (2.36)$$

Για τις μεταβλητές a, b, c, d διακρίνουμε δύο περιπτώσεις, ανάλογα με το είδος της πόλωσης που έχουμε στο σύστημα που μελετάμε. Πρέπει να αναφέρουμε ότι μόνο αυτά τα δύο είδη πόλωσης υποστηρίζονται στο μοντέλο αυτό, κατακόρυφη και οριζόντια, και όχι κυκλική, ελλειπτική κλπ. Η

συχνότητα f της εξίσωσης (2.36) πρέπει να δίνεται σε GHz. Έτσι, με R να είναι ο ρυθμός βροχόπτωσης σε mm/hr έχουμε:

- Για οριζόντια πόλωση:

$$a_h = 1,422 \times 10^{-9} R^2 + 2,03 \times 10^{-7} R - 1,21 \times 10^{-5} \quad (2.37)$$

$$b_h = 1,963 \times 10^{-7} R^2 + 8,618 \times 10^{-7} R + 0,0019 \quad (2.38)$$

$$c_h = 2,114 \times 10^{-6} R^2 + 0,01 \times R - 0,036 \quad (2.39)$$

$$d_h = 3 \times 10^{-5} R^2 - 0,040 \times R - 0,031 \quad (2.40)$$

- Για κατακόρυφη πόλωση

$$a_v = -5,520 \times 10^{-12} R^3 + 3,26 \times 10^{-9} R^2 - 1,21 \times R \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-6} \quad (2.41)$$

$$b_v = 8 \times 10^{-10} R^3 - 4,552 \times 10^{-7} R^2 - 3,03 \times R \times 10^{-5} + 0,001 \quad (2.42)$$

$$c_v = -5,71 \times 10^{-9} R^3 + 6 \times 10^{-7} R^2 + 8,707 \times R \times 10^{-3} - 0,018 \quad (2.43)$$

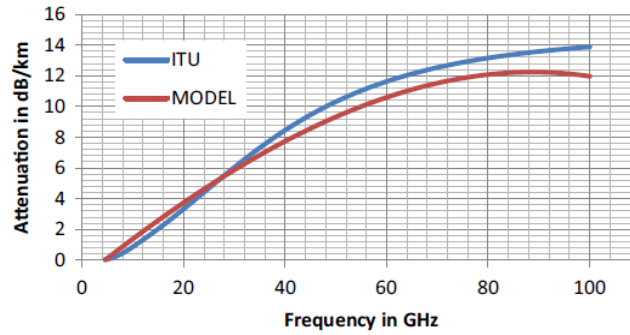
$$d_v = -1,073 \times 10^{-7} R^3 + 1,068 \times 10^{-4} R^2 - 0,0598 \times R + 0,0442 \quad (2.44)$$

Σημείωση: Αναφορικά με την εξίσωση (2.37), εντοπίστηκε ένα λάθος. Εντός του paper έλειπε ο όρος $\times 10^{-5}$, με αποτέλεσμα να μην γίνονται σωστοί υπολογισμοί επιλέγοντας ως πόλωση την οριζόντια. Μετά από μελέτη της γραφικής παράστασης για το πολυώνυμο a_h , και από αρκετές δοκιμές με τιμές για επαλήθευση, βρέθηκε ότι έλειπε ο όρος που προαναφέραμε.

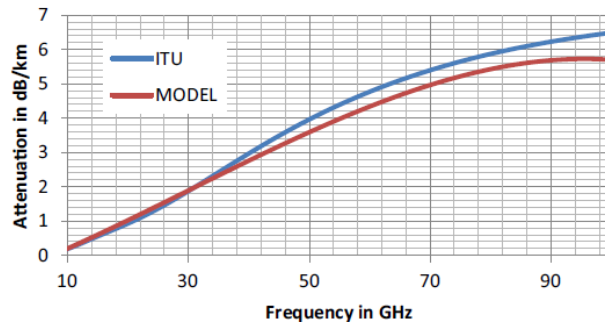
Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.37) έως (2.44) μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες. Η συχνότητα λειτουργίας και ο ρυθμός βροχής είναι οι μόνοι παράγοντες που μας απασχολούν. Αυτό καθιστά το μοντέλο αυτό πολύ εύκολο στους υπολογισμούς. Τα απλά βήματα που ακολουθούμε:

- 1) Βρίσκουμε την τιμή του ρυθμού βροχής σε mm/hr .
- 2) Βάζουμε την τιμή στις παραπάνω εξισώσεις (όπου R), ανάλογα με την πόλωση.
- 3) Αφού υπολογίσουμε τις 4 τιμές, τις βάζουμε στην αρχική εξίσωση.
- 4) Βρίσκουμε την ειδική απόσβεση $A \left(\frac{dB}{km} \right)$.
- 5) Υπολογίζουμε τις τελικές απώλειες, πολλαπλασιάζοντας την ειδική απόσβεση με την απόσταση της ζεύξης σε km .

Για ρυθμό βροχόπτωσης $R = 10 mm/hr$ με οριζόντια πόλωση στο Σχήμα 21 και $R = 10 mm/hr$ με κατακόρυφη πόλωση Σχήμα 22, μπορούμε να δούμε την σύγκριση της ειδικής απόσβεσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα όπως παρουσιάζεται στο νέο μοντέλο που φαίνεται με **κόκκινο**, και σε αυτό της ITU που φαίνεται με **μπλέ**:



Σχήμα 21: Ειδική απόσβεση μοντέλου με συχνότητα για οριζόντια πόλωση και ITU [15].



Σχήμα 22: Ειδική απόσβεση μοντέλου με συχνότητα για κατακόρυφη πόλωση και ITU [15].

2.4.3 Συμπεράσματα

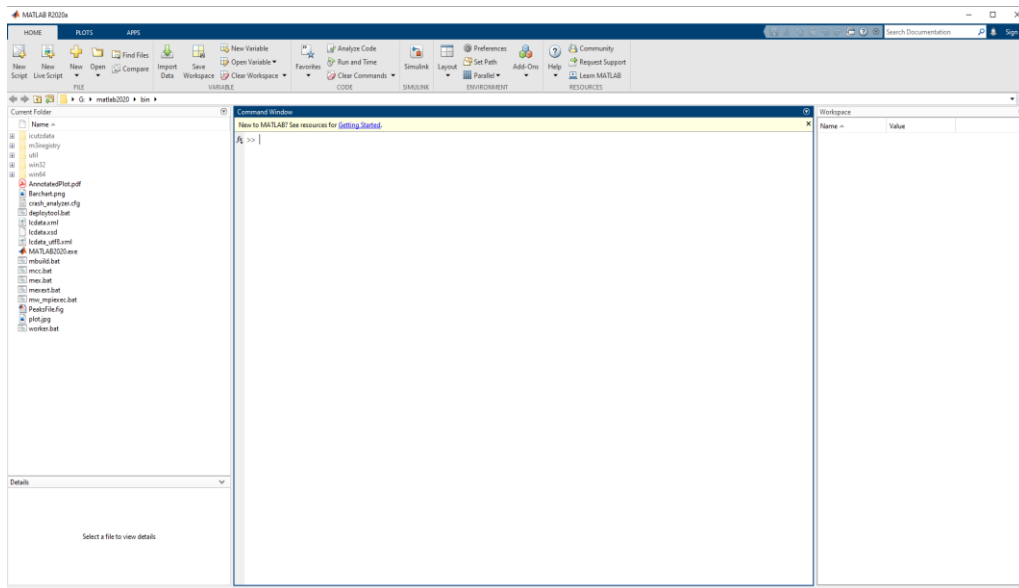
Όπως μπορούμε να δούμε στην παράγραφο 2.4.1, το μοντέλο κινείται στο ίδιο μήκος κύματος με αυτό της ITU. Παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα, με το νέο ωστόσο να επισημαίνει ότι η ITU δεν λαμβάνει αρκετά υπόψιν τις απώλειες για μεγαλύτερες συχνότητες στα μοντέλα της. Πρόκειται για ένα στατιστικό μοντέλο όπως και της ITU, έχει επαληθευτεί πειραματικά με δεδομένα άλλων μελετών και εφαρμόζεται παγκοσμίως. Μετά από την πειραματική διαδικασία και από μελέτες παρατηρήθηκαν τα εξής:

- ✓ Όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, αυξάνεται και η τιμή της ειδικής απόσβεσης
- ✓ Για οριζόντια πόλωση, ο ρυθμός λαθών είναι μεγαλύτερος από 10% για συχνότητες 10-15 GHz, ενώ είναι μικρότερος από 10% για συχνότητες άνω των 20 GHz. Το ίδιο παρατηρήθηκε και για αύξηση του ρυθμού βροχής. Επομένως το συγκεκριμένο είναι ένα πολύ αξιόπιστο μοντέλο.
- ✓ Χρησιμοποιείται μία απλή τριτοβάθμια εξίσωση που είναι πολύ εύκολη στον υπολογισμό, αντί να χρησιμοποιούνται πολλές και σύνθετες μεταβλητές.

Για τον υπολογισμό των απωλειών είναι απαραίτητα μόνο 2 δεδομένα, η συχνότητα λειτουργίας και ο ρυθμός βροχόπτωσης.

Κεφάλαιο 3ο: Ανάπτυξη της εφαρμογής στο περιβάλλον Matlab

Στα πλαίσια της πτυχιακής αυτής, αναπτύχθηκε μία εφαρμογή υπολογισμού των απωλειών από τα μοντέλα βροχόπτωσης καθώς και από τον ελεύθερο χώρο. Για την ανάπτυξη επιλέχθηκε το πρόγραμμα Matlab της MathWorks.



Σχήμα 23: Περιβάλλον Matlab.

Η επιλογή στηρίχθηκε στο γεγονός πως το συγκεκριμένο περιβάλλον είναι αρκετά κατανοητό και οργανωμένο, κάνοντας το σχεδιασμό της εφαρμογής πιο απλό κατά τη διάρκεια του προγραμματισμού. Το περιβάλλον αυτό διαθέτει 3 διαφορετικές λειτουργίες. Πρώτον, την απλή λειτουργία, όπου μπορούμε να προγραμματίζουμε και να εκτελούμε υπολογισμούς καθώς και να παίρνουμε γραφικές παραστάσεις, δίνοντας τις κατάλληλες εισόδους. Δεύτερον, τη λειτουργία Simulink, το οποίο χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση και την ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων όπως για παράδειγμα ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος. Τέλος, το περιβάλλον app designer μέσα στο οποίο αναπτύχθηκε τελικά η εφαρμογή της πτυχιακής.

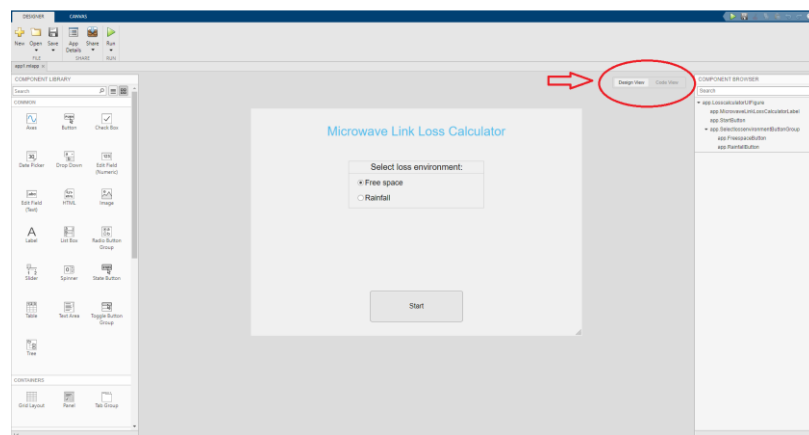
Το app designer έχει ουσιαστικά 2 βασικούς πυλώνες για την ανάπτυξη μίας εφαρμογής, drag and drop τα στοιχεία της εφαρμογής και τον προγραμματισμό του κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Ο σχεδιασμός γίνεται πάνω σε έναν καμβά, μία αρχική οθόνη, στην οποία μπορούμε ελεύθερα να προσθέτουμε στοιχεία απλώς «σέρνοντάς τα» στην θέση που επιθυμούμε. Με αυτό τον τρόπο, διαμορφώνουμε την τελική μορφή της εφαρμογής μας (app layout), αυτό δηλαδή που θα βλέπει ο χρήστης που θα την χρησιμοποιεί. Έπειτα προχωράμε στον προγραμματισμό του κάθε στοιχείου ξεχωριστά μέσω της γλώσσας προγραμματισμού της Matlab, δίνοντας τις λειτουργίες που επιθυμούμε να εκτελούνται από το κάθε «πάτημα».

Στο περιβάλλον της Matlab, ο πρώτος πυλώνας (σχεδιασμός) συμβαίνει στο παράθυρο “Design View” όπου βλέπουμε τον καμβά στο κέντρο της οθόνης, την λίστα με τα διαθέσιμα στοιχεία όπως κουμπιά, πίνακες, συστήματα αξόνων κλπ στα αριστερά της οθόνης και στα δεξιά έχουμε άλλη μία

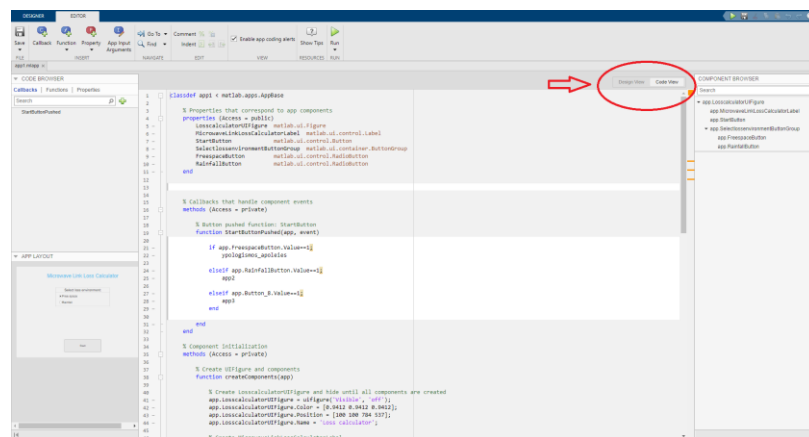
λίστα με τα στοιχεία που έχουμε ήδη δημιουργήσει, το καθένα με το όνομα του. Ο δεύτερος πυλώνας, αυτός του προγραμματισμού, συμβαίνει στο παράθυρο “Code View”. Στο κέντρο της οθόνης βλέπουμε να απλώνεται όλος ο κώδικας που βρίσκεται πίσω από την εφαρμογή και από το κάθε στοιχείο. Όλες οι βασικές συναρτήσεις, μεταβλητές και αρχικοποιήσεις που είναι απαραίτητες για την λειτουργία της εφαρμογής δημιουργούνται αυτόματα από το app designer και δεν μπορούν να μεταβληθούν από τον προγραμματιστή. Στα αριστερά της οθόνης βλέπουμε το “Code Browser”. Εδώ μπορούμε να ελέγχουμε ακριβώς ποιές συναρτήσεις έχουν κληθεί στην εφαρμογή μας, τι λειτουργίες επιτελούν καθώς και να βλέπουμε τα callbacks της εφαρμογής.

- **Callbacks:** Εντολές οι οποίες εκτελούνται όταν ο χρήστης της καλεί μέσω μία άλλης, προκαθορισμένης, συνάρτησης.

Ο έλεγχος των callbacks είναι απαραίτητος για την εφαρμογή μας, μίας και όλοι οι υπολογισμοί εκτελούνται μετά από το πάτημα ενός κουμπιού. Για παράδειγμα, όταν το κουμπί με όνομα «Button1» πατηθεί (callback), καλείται η συνάρτηση με όνομα Button1Pushed(app, event) και ξεκινάει η λειτουργία της εφαρμογής. Κάτω αριστερά στην οθόνη μας βλέπουμε το παράθυρο “app layout”, το πώς φαίνεται η εφαρμογή μας δηλαδή. Όταν έχουμε ολοκληρώσει το σχεδιασμό και τον προγραμματισμό μας, πατάμε το πλήκτρο f5 ή το Run που βρίσκεται στο κέντρο της οθόνης μας ώστε να «τρέξουμε» το πρόγραμμα και να ελέγξουμε τη λειτουργία του. Στα σχήματα 24 και 25 βλέπουμε τα παράθυρα **Design** και **Code View** :



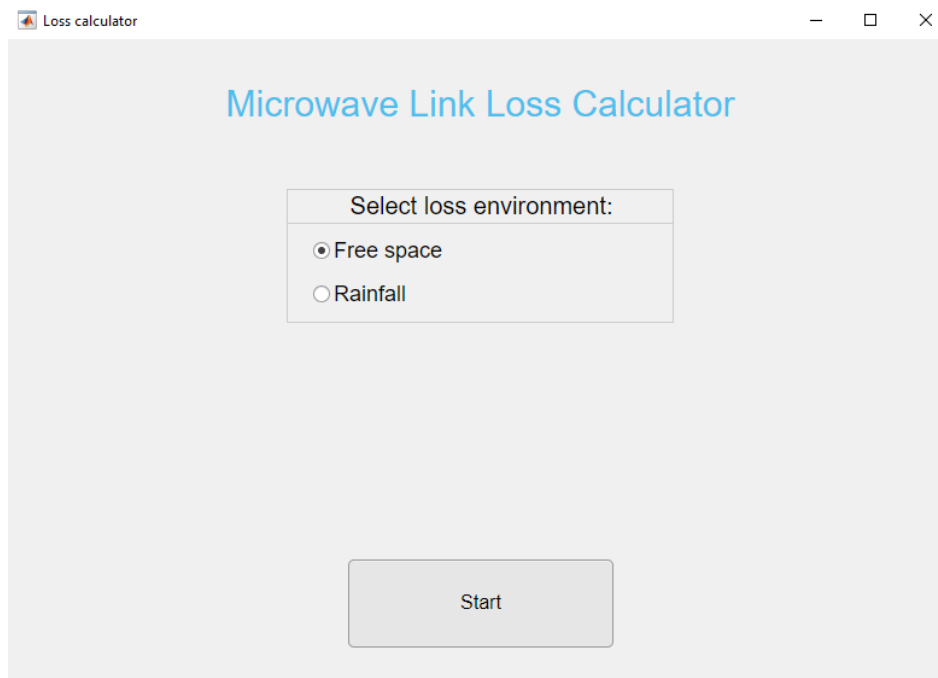
Σχήμα 24: Παράθυρο Design View.



Σχήμα 25: Παράθυρο Code View.

Στα πλαίσια της πτυχιακής αναπτύχθηκαν 3 επιμέρους εφαρμογές, μία αρχική-επιλογής υπολογισμού- και οι δύο βασικές εφαρμογές που υπολογίζουν απώλειες στις 2 διαφορετικές συνθήκες που μας απασχολούν, του ελεύθερου χώρου και της βροχόπτωσης. Επιλέχθηκε ο διαχωρισμός αυτός προκειμένου να μπορούμε να μελετήσουμε και να αντλήσουμε πληροφορίες από το κάθε γεγονός ξεχωριστά, ενώ υπάρχει και η επιλογή να βλέπουμε τις απώλειες από τη συμβολή και των δύο, όπως θα δούμε και αργότερα.

Ανοίγοντας την εφαρμογή μας, βλέπουμε την πρώτη εφαρμογή όπου θα επιλέξουμε τις συνθήκες υπολογισμού. Το αρχείο με τίτλο “**LossCalculator.mlapp**” είναι της μορφής .mlapp, δηλαδή μία εφαρμογή του **app designer** και της Matlab. Εκτελώντας το, εμφανίζεται το app layout της πρώτης εφαρμογής όπως βλέπουμε στο σχήμα 26:



Σχήμα 26: Εφαρμογή 1 ή Loss Calculator.

Στην αρχική μας οθόνη βλέπουμε τον τίτλο της εφαρμογής, το κεντρικό μενού από όπου επιλέγουμε τις συνθήκες υπολογισμού, και το πλήκτρο έναρξης. Πίσω από την εφαρμογή βρίσκεται το εξής απλό τμήμα κώδικα:

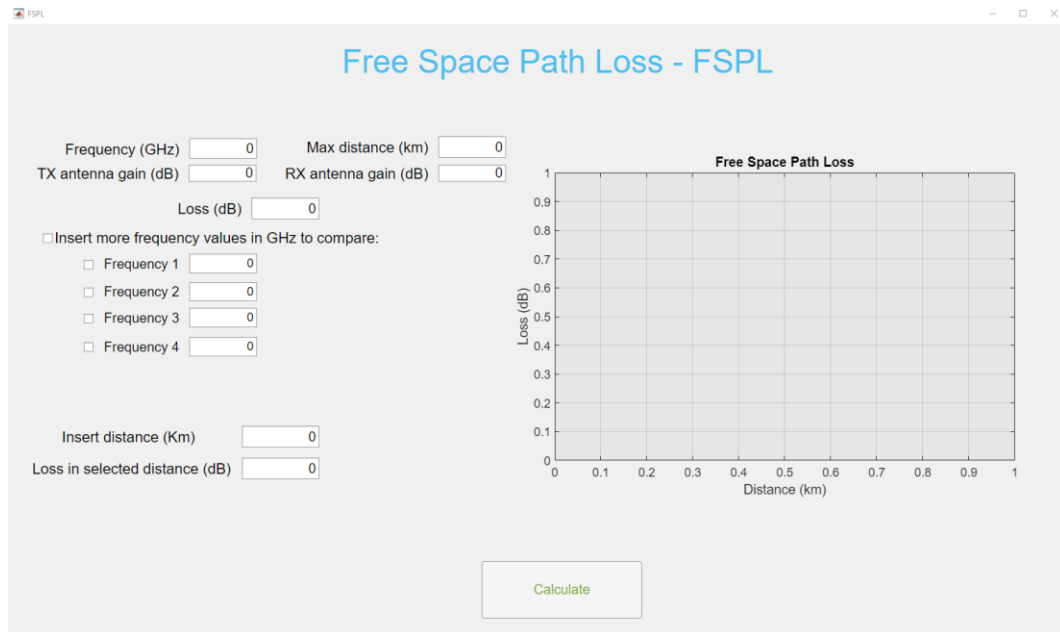
```
function StartButtonPushed(app, event)
    if app.FreespaceButton.Value==1;
        freespace
    elseif app.RainfallButton.Value==1;
        rainfall
    end
end
```

Όπως είδαμε παραπάνω, πατώντας το “Start” το οποίο είναι callback, καλείται η αντίστοιχη συνάρτηση. Ο βρόχος if-elseif βρίσκεται πίσω από το μενού επιλογής των συνθηκών. Επιλέγοντας το Free space, εκτελείται το τμήμα του βρόχου με την εντολή if. Έτσι, καλείται η συνάρτηση με όνομα freespace, που με τη σειρά της θα ανοίξει την εφαρμογή freespace.mlapp, δηλαδή την δεύτερη κατά

σειρά εφαρμογή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής, και ασχολείται αποκλειστικά με τον υπολογισμό των απωλειών λόγω ελεύθερου χώρου. Επιλέγοντας το Rainfall, εκτελείται το τμήμα `elseif` και με τον ίδιο τρόπο ανοίγει η τρίτη εφαρμογή για υπολογισμό απωλειών λόγω βροχοπτώσης.

3.1 Υπολογισμός απωλειών ελεύθερου χώρου – Free Space Path Loss

Ανοίγοντας την εφαρμογή για τον ελεύθερο χώρο (Freespace), την οποία πλέον θα αναφέρουμε ως “FSPL”, βλέπουμε το αντίστοιχο παράθυρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 27:



Σχήμα 27: Υπολογισμός απωλειών λόγω ελεύθερου χώρου.

Στα αριστερά της οθόνης βρίσκονται τα δεδομένα που θα εισάγουμε για τον υπολογισμό των απωλειών καθώς και ορισμένες ρυθμίσεις/προεπιλογές για τα γραφήματα που θέλουμε να δούμε. Στα δεξιά βρίσκεται το στοιχείο UIAxes του app designer, που θα χρησιμοποιηθεί ως σύστημα αξόνων για την απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων. Τέλος, κεντρικά και χαμηλά στην οθόνη βλέπουμε το κουμπί Calculate το οποίο πατάμε για να ξεκινήσουν οι υπολογισμοί από την εφαρμογή.

Οι είσοδοι **Frequency** και **Max Distance** είναι τα δύο βασικά δεδομένα που εισάγει ο χρήστης. Στο πρώτο πεδίο εισάγουμε τη συχνότητα λειτουργίας σε GHz και στο δεύτερο την απόσταση ανάμεσα στις κεραίες εκπομπού-δέκτη σε km. Πατώντας το **Calculate**, στο πεδίο Loss (dB), θα εμφανιστούν οι συνολικές απώλειες λόγω ελεύθερου χώρου και στο UIAxes θα εμφανιστεί η γραφική παράσταση των απωλειών σε συνάρτηση με την απόσταση. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εφαρμογή βασίζεται στην εξίσωση (2.2) - εξίσωση του Friis - για τους υπολογισμούς. Παράλληλα, μπορεί να γίνει ακόμη ένας υπολογισμός, σε άλλη απόσταση από την μέγιστη. Για παράδειγμα, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες στο μέσον της απόστασης, κάνοντας χρήση του πεδίου **Insert distance** και να δούμε το αποτέλεσμα στο ακριβώς κάτω πεδίο. Τέλος, τα πεδία **TX antenna gain** και **RX antenna gain** αναφέρονται στα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα (σε dB). Τα κέρδη που εισάγουμε αφαιρούνται από τις συνολικές απώλειες, όπως φαίνεται στο πεδίο **Loss (dB)**. Προκειμένου να δούμε την γραφική παράσταση στο UIAxes, ορίζουμε μία

μεταβλητή d με τιμές από 1 (όχι το μηδέν σαν απόσταση) έως την τιμή που δίνουμε στο πεδίο Max distance για τον άξονα X και την εξίσωση loss για τον άξονα Y. Με την εντολή plot θα δούμε την γραφική παράσταση:

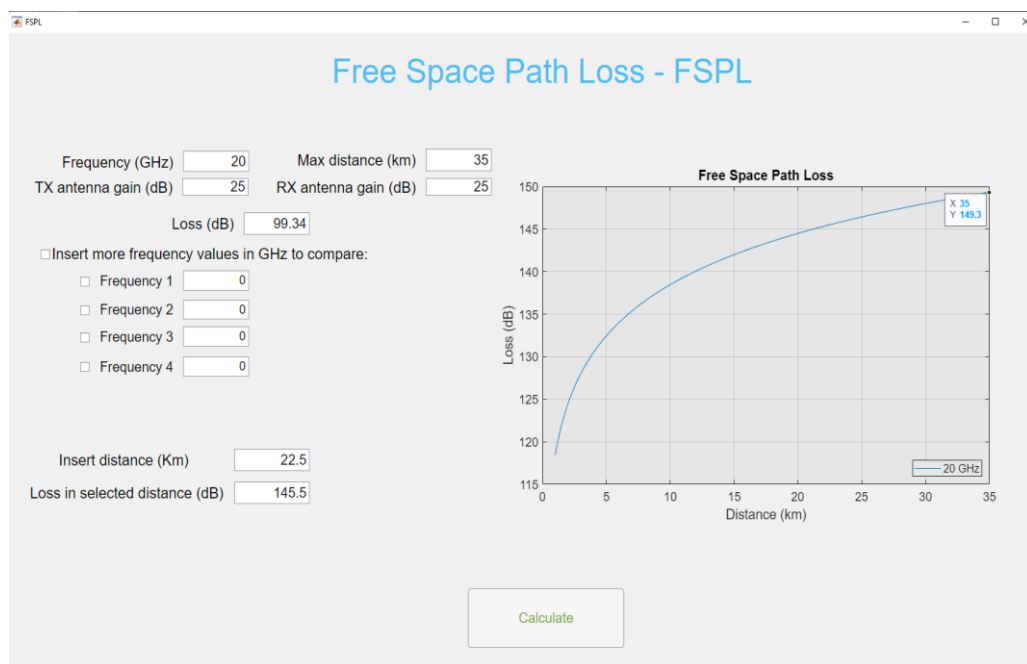
```
d=0.1:1:100;

loss= 32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d));
plot(app.UIAxes,d,loss)
```

Η μεταβλητή d αποκτά το ρόλο της απόστασης, και η μεταβλητή `app.frequency.Value` είναι η τιμή της συχνότητας που δίνουμε σαν δεδομένο εμείς. Ο πολλαπλασιασμός της συχνότητας με το 1000 γίνεται διότι στην εξίσωση (2.2) η τιμή της συχνότητας πρέπει να είναι σε MHz, έτσι γίνεται η μετατροπή. Για τον υπολογισμό στη μέγιστη απόσταση χρησιμοποιούμε την ίδια γραμμή κώδικα αλλάζοντας την μεταβλητή d με την μεταβλητή `app.distance.Value`, η οποία είναι η τιμή Max Distance που δίνει η χρήστης. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο λειτουργεί και ο επιπλέον υπολογισμός στην επιθυμητή απόσταση.

Σημείωση : Σε όλες τις εφαρμογές έχει επιλεγθεί η απόσταση (άξονας X) να ξεκινά από τα 100m και όχι από το μηδέν, μίας και απόσταση μηδέν δεν έχει ουσιαστικό νόημα. Μία εξαίρεση συναντάται μόνο, στο μοντέλο Silva Melo, όπως θα συζητήσουμε παρακάτω.

Έτσι, για μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη με συχνότητα λειτουργίας τα 20 GHz, μέγιστη απόσταση τα 35 km, με έναν επιπλέον υπολογισμό στα 22,5 km (μέσον της απόστασης) και κέρδη κεραιών εκμπομπής και λήψης 25 dB, βλέπουμε τα αποτελέσματα του σχήματος 28:

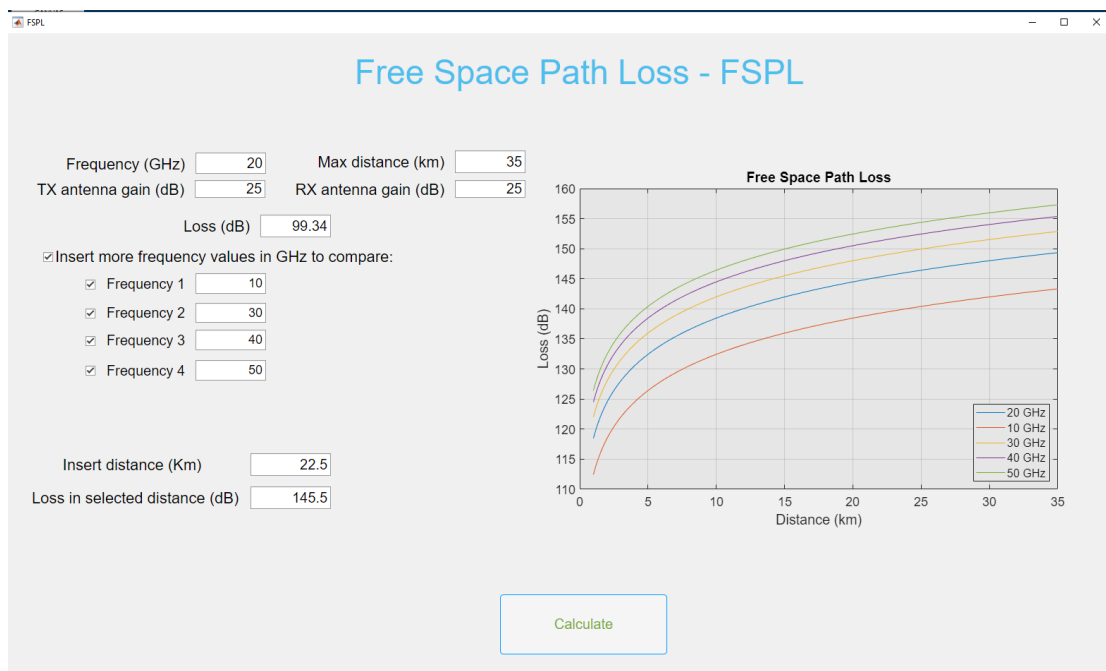


Σχήμα 28: Παράδειγμα υπολογισμού απωλειών ελεύθερου χώρου για μία συχνότητα.

Στο σχήμα 28 βλέπουμε τους υπολογισμούς και τη γραφική παράσταση. Πάνω δεξιά βλέπουμε τις απώλειες ελεύθερου χώρου όπως υπολογίζονται από την εξίσωση του Friis. Στο πεδίο Loss (dB) είναι οι συνολικές απώλειες. Επομένως $149,3(\text{FSPL}) - 25(\text{TX antenna gain}) - 25(\text{RX antenna gain}) = 99,3 \text{ dB}$. Όπως αναφέραμε, εισάγοντας τα δύο δεδομένα βλέπουμε τις απώλειες σε dB, τον επιπλέον υπολογισμό και τη γραφική παράσταση στα δεξιά. Κάνοντας χρήση του κέρσορα του ποντικιού μας, μπορούμε να επιλέξουμε οποιοδήποτε σημείο της γραφικής παράστασης και να

προσδιορίσουμε ακριβώς τις συντεταγμένες του, δηλαδή τις απώλειες και την απόσταση όπου τις συναντάμε. Επιπλέον, η Matlab μας δίνει τη δυνατότητα να αποθηκεύσουμε στην επιφάνεια εργασίας του υπολογιστή μας τη γραφική παράσταση που βλέπουμε είτε ως αρχείο γραφικών τύπου .png, είτε ως εικόνα τύπου .jpg, για να την επεξεργαστούμε όπως θέλουμε. Μετά από κάθε φορά που πατάμε το Calculate, πρέπει να καθαρίζουμε τους άξονες ώστε να μην έχουμε την μία παράσταση πάνω στην άλλη, εφόσον έχουμε παραπάνω από μία. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της εντολής `cla(app.UIAxes)`, η οποία “καθαρίζει” το UIAxes και την συντάσσουμε στην αρχή του προγράμματος, ώστε να εκτελείται με κάθε πάτημα.

Στη συνέχεια, μπορούμε να επιλέξουμε κι άλλες συχνότητες εκτός της μίας που εισάγουμε στην αρχή, και να έχουμε κι άλλες γραφικές παραστάσεις. Έτσι, υπάρχει και η δυνατότητα σύγκρισης ανάμεσα στις συχνότητες ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα και τη συμπεριφορά του μοντέλου. Αρχικά, ο χρήστης πρέπει να «κάνει τικ» το κουτάκι **Insert more frequency values in GHz to compare**. Έπειτα, επιλέγοντας το αντίστοιχο κουτάκι και συμπληρώνοντας την επιθυμητή συχνότητα, θα έχουμε και τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις. Εάν, για παράδειγμα, επιλέξουμε και τις 4 συχνότητες, και συμπληρώσουμε τις τιμές 10,30,40,50 θα έχουμε 5 διαφορετικές γραφικές παραστάσεις στο UIAxes, μία για κάθε συχνότητα μαζί με την αρχική συχνότητα. Όσες συχνότητες συμπληρώνουμε στα πεδία, τόσες παραστάσεις θα έχουμε. Το ίδιο παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα 29 για τις επιπλέον συχνότητες:



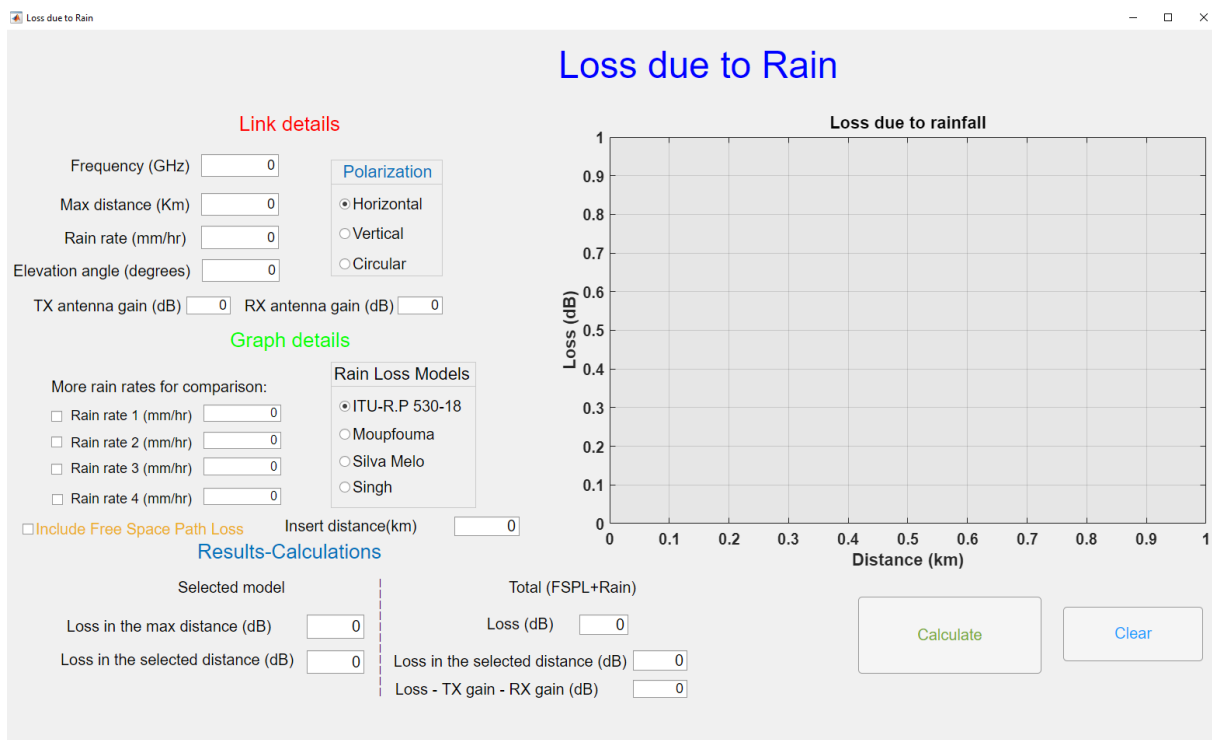
Σχήμα 29: Επιπλέον συχνότητες για σύγκριση.

Η κάθε γραφική παράσταση απεικονίζεται με ένα διαφορετικό χρώμα, για κάθε διαφορετική συχνότητα. Χαμηλά και δεξιά εντός του UIAxes, μπορούμε να δούμε το υπόμνημα που μας βοηθά στην επιλογή που θέλουμε να κάνουμε για να μελετήσουμε. Με αυτό τον τρόπο, η σύγκριση ανάμεσα στις παραστάσεις είναι αρκετά εύκολη, με τον κέρσορά μας μπορούμε να επιλέξουμε σημεία και να βρούμε απόσταση και απώλειες, και πάλι μπορούμε να αποθηκεύσουμε το γράφημα, όπως και πριν. Επίσης σημαντική είναι η χρήση της εντολής `hold(app.UIAxes, "on")`. Με την εντολή αυτή, η κάθε γραφική παράσταση που σχηματίζεται από το κάθε checkbox που επιλέγουμε, «μένει» στους άξονες. Χωρίς αυτήν, κάθε φορά που εκτελούμε το πρόγραμμα πατώντας το κουμπί calculate, η μία

γραφική παράσταση θα έσβηνε την προηγούμενη και θα έπαιρνε τη θέση της. Έτσι δεν θα μπορούσαμε να δούμε πάνω από 1 παράσταση. Με αυτό τον τρόπο βλέπουμε όσες γραφικές παραστάσεις επιθυμούμε.

3.2 Υπολογισμός απωλειών λόγω βροχόπτωσης

Με την ίδια λογική αναπτύχθηκε και η τρίτη εφαρμογή για τον υπολογισμό των απωλειών. Επιλέγοντας το αντίστοιχο πεδίο από την αρχική μας εφαρμογή, ανοίγει το παράθυρο που βλέπουμε το σχήμα 30:

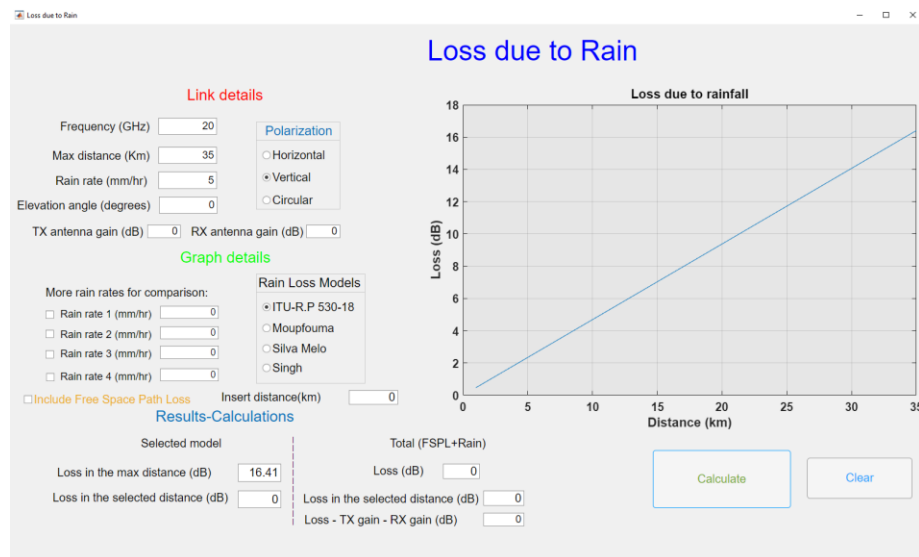


Σχήμα 30: Εφαρμογή για απώλειες λόγω βροχόπτωσης.

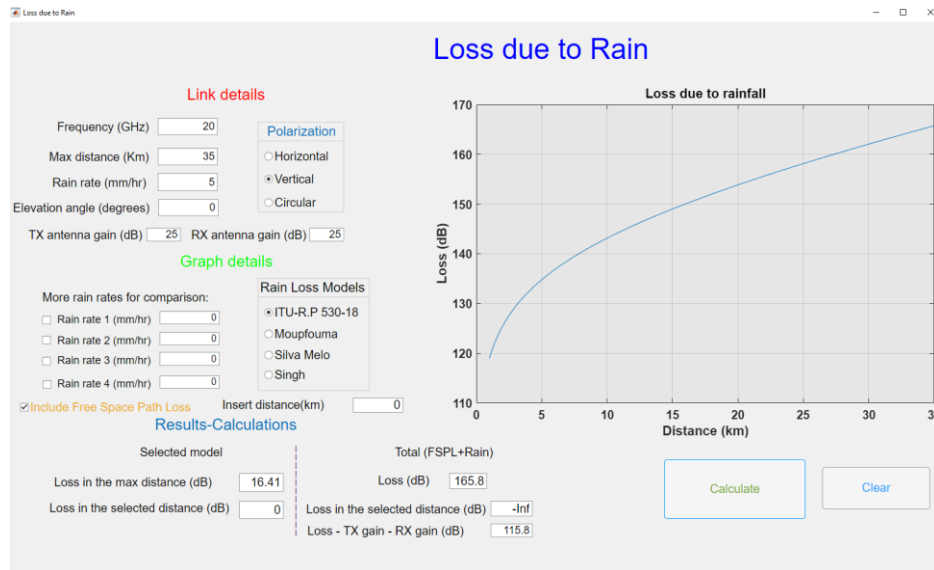
Σε αυτή την εφαρμογή υπάρχουν πολλά περισσότερα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό, παρέχονται περισσότερα αποτελέσματα – περισσότεροι υπολογισμοί, ο τρόπος οργάνωσης ωστόσο παραμένει ο ίδιος. Κάτω από τον τίτλο **Link details** στα αριστερά της οθόνης, εκτός από τα πλαίσια **Frequency** και **Max distance**, έχουμε ακόμη δύο. Το πεδίο **Rain Rate** σε mm/hr που είναι ο ρυθμός βροχόπτωσης καθώς και το **Elevation angle** σε μοίρες, δηλαδή την γωνία ανύψωσης των κεραιών. Το τελευταίο βασικό στοιχείο για τον υπολογισμό μας είναι η επιλογή της πόλωσης του ΗΜ σήματος, η οποία πραγματοποιείται από το μενού με τίτλο **Polarization** (Horizontal-οριζόντια, Vertical-Κατακόρυφη και Circular-Κυκλική). Το είδος της πόλωσης, μαζί με τη συχνότητα, επηρεάζουν τις τιμές των μεταβλητών k και a , όπως συζητήσαμε στο Κεφάλαιο 2. Έχουμε επίσης τα πεδία **TX antenna gain** και **RX antenna gain**, που εκφράζουν και πάλι τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα. Προχωρώντας, κάτω από τον τίτλο **Graph details**, βλέπουμε επιπλέον 4 ρυθμούς βροχόπτωσης που μπορούμε να εισάγουμε για να δούμε κι άλλες γραφικές παραστάσεις για σύγκριση. Εδώ βασικός παράγοντας είναι ο ρυθμός βροχόπτωσης. Το αμέσως επόμενο σημαντικότερο στοιχείο που πρέπει να επιλέξουμε είναι το επιθυμητό μοντέλο

απωλειών λόγω βροχόπτωσης από το μενού **Rain Loss Models** όπως φαίνεται στο κέντρο της οθόνης. Για επιπλέον πληροφορίες για το κάθε μοντέλο, μπορούμε να ανατρέξουμε στο κεφάλαιο 2.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι χωρίς να επιλέξουμε το κουτάκι **Include Free Space Path Loss**, οι παραστάσεις που θα δούμε στο UIAxes αφορούν αποκλειστικά την βροχόπτωση ανάλογα με το μοντέλο που επιθυμούμε. Επιλέγοντας το κουτάκι αυτό θα εμφανιστούν οι υπολογισμοί των απωλειών συνολικά, από ελεύθερο χώρο και βροχόπτωση μαζί. Ακριβώς δίπλα βρίσκεται το πεδίο **Insert distance(km)**, όπου μπορούμε να επιλέξουμε μία συγκεκριμένη απόσταση για υπολογισμό απωλειών, και ανάλογα με το εάν έχουμε επιλέξει και τον ελεύθερο χώρο ή όχι, να πάρουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Όλοι οι υπολογισμοί εμφανίζονται κάτω από τον τίτλο **Results-Calculations**. Αριστερά της διαχωριστικής γραμμής βλέπουμε τους υπολογισμούς για το εκάστοτε μοντέλο που επιλέγουμε από το μενού πάνω. Στο πάνω πεδίο παίρνουμε τις απώλειες του μοντέλου στη μέγιστη απόσταση που δίνουμε και στο κάτω παίρνουμε τις απώλειες στην επιλεγμένη απόσταση. Δεξιά της βλέπουμε τις συνολικές απώλειες, από βροχή και ελεύθερο χώρο. Και πάλι στο πάνω πεδίο είναι οι απώλειες στη μέγιστη απόσταση, ενώ στο κάτω στην επιλεγμένη απόσταση. Επιλέγοντας το μοντέλο ITU-R P.530-18, με συχνότητα 20 GHz, μέγιστη απόσταση τα 35 km, ρυθμό βροχόπτωσης 5 mm/hr, μηδενική γωνία ανύψωσης, κατακόρυφη πόλωση και χωρίς να επιλέξουμε τον ελεύθερο χώρο, βλέπουμε το σχήμα 31:



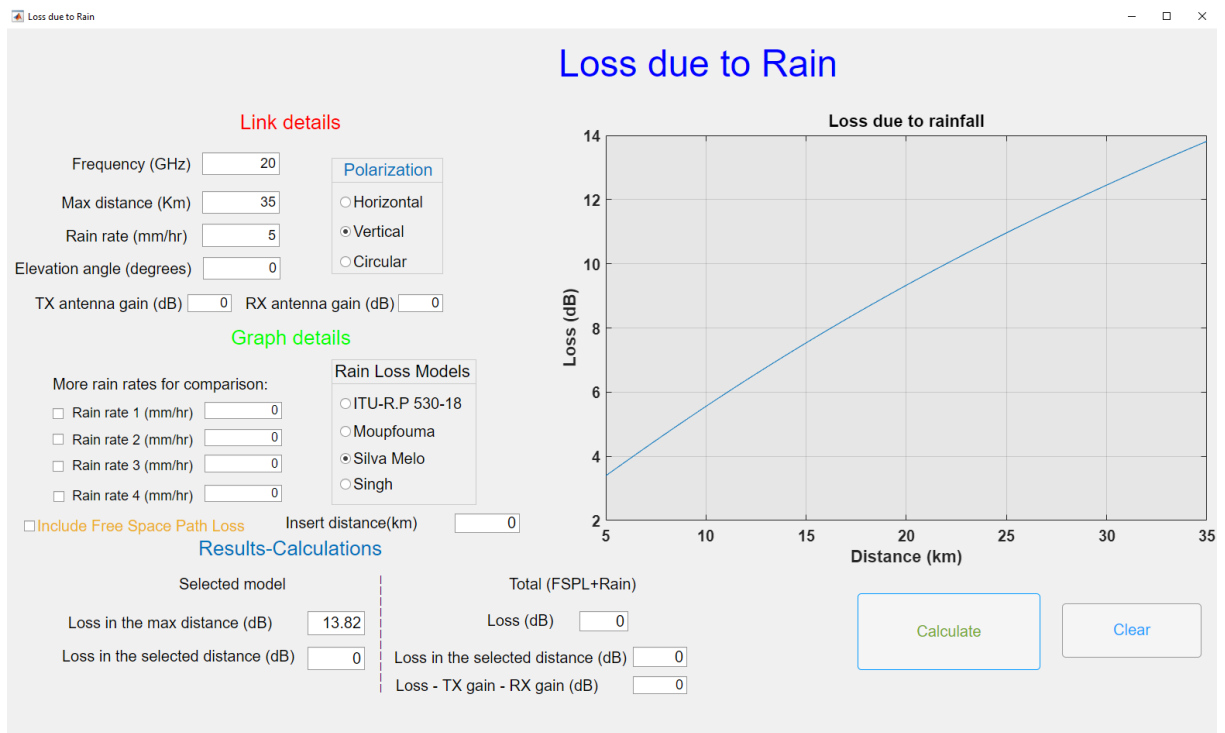
Σχήμα 31: Υπολογισμός απωλειών με χρήση του μοντέλου ITU-R P.530-18.



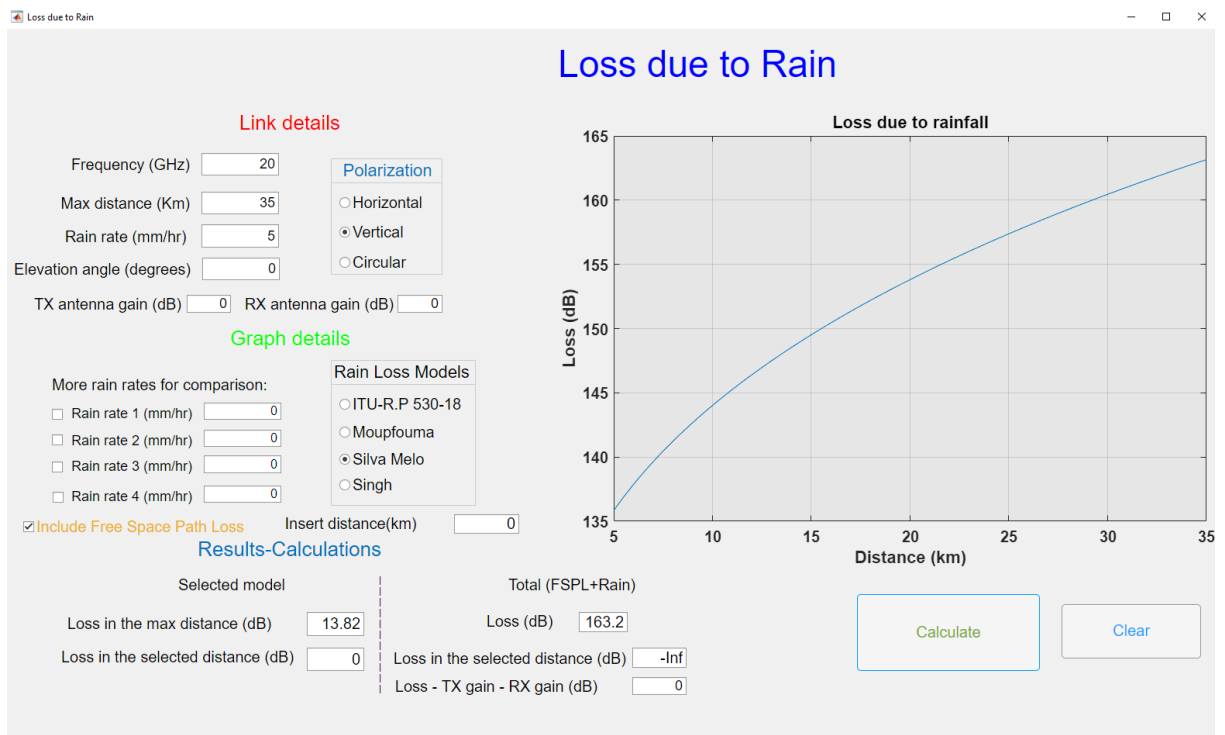
Σχήμα 32: Υπολογισμός συνολικών απωλειών.

Στα σχήματα 31 και 32 βλέπουμε τις απώλειες απο το μοντέλο, και απο το μοντέλο μαζί με τον ελεύθερο χώρο αντίστοιχα. Έχουμε επίσης και κέρδη 25 dB για την κάθε κεραία, τα οποία αφαιρούνται απο τις συνολικές απώλειες, όπως βλέπουμε στο πεδίο **Loss – TX gain – RX gain (dB)**. Οι συνολικές απώλειες είναι 115,8 dB ($149,4 \text{ FSPL} + 16,41 \text{ Rain} = 165,8 - 25(\text{TX gain}) - 25(\text{RX gain}) = 115,8 \text{ dB}$). Στο κάτω σχήμα εμφανίζεται το σύνολο, δηλαδή το σχήμα που θα βλέπαμε στην εφαρμογή Free Space Path Loss και το σχήμα 31. Κάτω από το Results-Calculations, στα αριστερά και στα δεξιά υπολογίζονται οι απώλειες όπως περιγράψαμε πάνω. Επιλέγοντας το μοντέλο **Moupfouma** θα έχουμε αντίστοιχα αποτελέσματα και υπολογισμούς, το ίδιο και με το μοντέλο **Singh**. Πριν προχωρήσουμε στις γραφικές παραστάσεις με επιπλέον ρυθμούς βροχόπτωσης, πρέπει να δούμε το μοντέλο **Silva Melo**. Η ιδιαιτερότητα αυτού του μοντέλου στηρίζεται, όπως συζητήσαμε στην ενότητα 2.3, στο ότι εδώ έχουμε ενεργό (δηλαδή μεταβλητό) ρυθμό βροχόπτωσης R_{eff} ο οποίος επηρεάζει την γραφική παράσταση. Το μοντέλο για μικρές τιμές απόστασης, δηλαδή κοντά στην κεραία εκπομπής, παρουσιάζει κάποιες τιμές απωλειών που δεν συνάδουν με τα υπόλοιπα μοντέλα, καθώς αυτές οι αποστάσεις ανήκουν στο near field της κεραίας και δεν μας αφορούν σε αυτή την ΠΕ. Έτσι μετά από δοκιμές θεωρήσαμε ότι η γραφική παράσταση θα ξεκινά από τα 5 km και όχι από τα 100m που έχουμε δώσει στα υπόλοιπα μοντέλα. Παρατηρήσαμε ότι από την τιμή αυτή και μετά το μοντέλο συμπεριφέρεται σύμφωνα με τις τιμές των υπολοίπων μοντέλων, δημιουργώντας μία καμπύλη λόγω του ενεργού ρυθμού βροχόπτωσης. Για το μοντέλο αυτό, χρησιμοποιώντας ίδιες τιμές με το παράδειγμα πάνω, και με την ίδια διάκριση για τον ελεύθερο χώρο έχουμε:

Κεφάλαιο 3



Σχήμα 33: Υπολογισμός απωλειών με χρήση του μοντέλου Silva Melo.



Σχήμα 34: Συνολικές απώλειες (Silva Melo + FSPL).

Παρατηρώντας την καμπύλη που υπάρχει στο σχήμα 33, δεν ακολουθείται η γραμμική συμπεριφορά των υπολοίπων μοντέλων, και αυτό φαίνεται και στην γραφική παράσταση των συνολικών απωλειών (σχήμα 34). Η καμπύλη εδώ είναι πιο «ομαλή» από τις άλλες περιπτώσεις.

Σημαντικό είναι επίσης να παρατηρήσουμε και την σημασία της γωνίας ανύψωσης (Elevation Angle). Η μηδενική ή μη μηδενική γωνία ανύψωσης, επηρεάζει άμεσα τους συντελεστές k και a . Ανάλογα με το είδος της πόλωσης, την συχνότητα και την γωνία ανύψωσης οι τιμές των συντελεστών μεταβάλλονται όπως φαίνεται στις εξισώσεις (3.1) και (3.2) :

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) (\cos \theta)^2 \cos 2\tau] / 2 \quad (3.1)$$

$$a = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) (\cos \theta)^2 \cos 2\tau] / 2k \quad (3.2)$$

Όπου με θ συμβολίζεται η γωνία ανύψωσης σε μοίρες, και με τ συμβολίζεται η γωνία κλίσης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, επίσης σε μοίρες. Οι τιμές του τ είναι 0 για οριζόντια πόλωση, 90° για κατακόρυφη πόλωση και 45° για κυκλική πόλωση.

Πρίν προχωρήσουμε στα σχήματα για επιπλέον ρυθμούς βροχόπτωσης, πρέπει να δούμε ορισμένα τμήματα του κώδικα. Καταρχάς, πίσω από το μενού με τίτλο [Polarization](#), υπάρχει ένας βρόχος if-elseif με την εξής μορφή:

```
if app.horizontal.Value==1
...

elseif app.vertical.Value==1
...

elseif app.circular.Value==1
...

end
```

Όπως βλέπουμε παραπάνω, όποιο είδος πόλωσης επιλέξουμε «μπαίνουμε» στον αντίστοιχο υποβρόχο. Εντός θα συναντήσουμε αρκετές γραμμές κώδικα οι οποίες ορίζουν αρχικά τις τιμές των σταθερών k και a . Ουσιαστικά, χρησιμοποιούμε τις δύο παραπάνω εξισώσεις, μεταβάλλοντας τον συντελεστή τ , ανάλογα με το είδος της πόλωσης. Όπως είπαμε παραπάνω, η συχνότητα επηρεάζει τις τιμές των k_H και k_V και έτσι αφού επιλέξουμε την πόλωση, οι δύο σταθερές παίρνουν μία τιμή που την διατηρούν σε όλους τους υπολογισμούς. Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο λειτουργεί και το μενού επιλογής μοντέλου, με τον ίδιο βρόχο. Στη συνέχεια, πίσω από την επιλογή [Include Free Space Path Loss](#), βρίσκεται η γραμμή κώδικα :

```
if app.CheckBox_1.Value==1
```

Επισημάνση: Και στις δύο περιπτώσεις, το διπλό ίσον (==) χρησιμοποιείται για σύγκριση ανάμεσα στις δύο πλευρές. Εάν επιλέξουμε το κουτάκι για τον ελεύθερο χώρο η τιμή του CheckBox_1 γίνεται 1, η γραμμή κώδικα αυτή ελέγχει εάν έχει όντως επιλεγεί το κουτάκι και αν ναι, τότε τρέχει τις επόμενες γραμμές κώδικα. Το μονό ίσον, λειτουργεί απλώς για μεταφορά τιμής από μία μεταβλητή σε μία άλλη.

Το υπόμνημα (legend) που βλέπουμε στο UIAxes, δεν εμφανίζει μόνο μία αριθμητική τιμή, αλλά και τη μονάδα mm/hr, το οποίο αποτελεί κείμενο. Αυτό πραγματοποιείται με την εντολή sprintf, όπου με το %d παίρνουμε την αριθμητική τιμή του ρυθμού βροχόπτωσης μαζί με την μονάδα και τα εκτυπώνουμε μαζί όπως φαίνεται στην γραμμή κώδικα κάτω:

```
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr', app.rain_rate.Value));
```

Μία επιπλέον ιδιαιτερότητα, στο μοντέλο Mourfouma, είναι ο συντελεστής $\zeta(L)$. Όπως είδαμε στην ενότητα 2.2, παίρνει τις τιμές που μας δίνει η εξίσωση (2.23) ανάλογα με την μέγιστη απόσταση. Το εξής τμήμα κώδικα ρυθμίζει αυτή την ιδιαιτερότητα:

```
if app.distance.Value<=7;
    z1=-100;
elseif app.distance.Value>7;
    z1=(44.2/app.distance.Value)^0.78;
end
```

Προχωρώντας, το μοντέλο Silva Melo είναι πιο σύνθετο από τα υπόλοιπα μοντέλα όσον αφορά τις γραφικές παραστάσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι έχουμε μεταβλητό (ενεργό) ρυθμό βροχόπτωσης R_{eff} και δραστικό μήκος διαδρομής d_{eff} που εξαρτώνται και τα δύο από την απόσταση και το ρυθμό βροχόπτωσης. Καθώς θέλουμε να δούμε μία γραφική παράσταση με άξονα X την απόσταση ξεκινώντας από τα 5 km για τον λόγο που συζητήσαμε παραπάνω, δίνουμε τιμές από 5 έως την μέγιστη απόσταση και έτσι δημιουργούνται 3 πίνακες τιμών. Καθώς δεν έχουν όλοι τις ίδιες διαστάσεις (γραμμές επί στήλες), δεν μπορούμε να προχωρήσουμε σε πράξεις ανάμεσά τους, χωρίς να μπορούμε να έχουμε τους υπολογισμούς που επιθυμούμε. Έτσι, χρειάστηκε να ορίσουμε ίδιες διαστάσεις για όλους τους πίνακες με το εξής τμήμα κώδικα:

```
i=1;
for d0=5:0.1:app.distance.Value
    deffd(i)=(d0)/(1+((d0)/(119*app.rain_rate.Value^(-
0.224)))));
    Reffd(i)=1.763*((app.rain_rate.Value)^(0.735+(0.917/d0)));
    g1d(i)=((Reffd(i)).^a)*k;
    i=i+1;
end
```

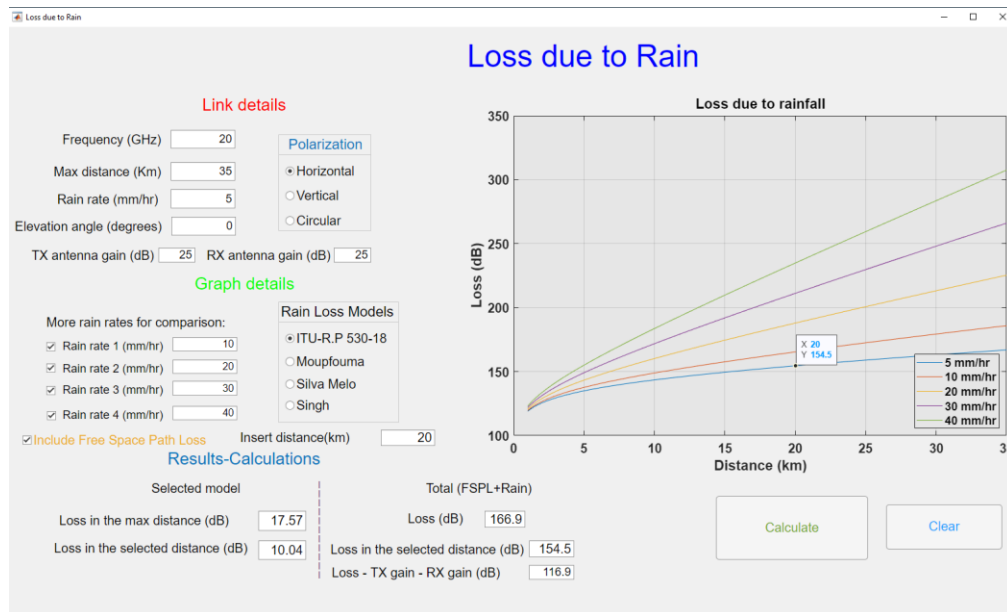
Ξεκινάμε ορίζοντας τον αριθμό των επαναλήψεων για τον βρόχο for. Ωστόσο, ο παράγοντας που θα καθορίσει τις διαστάσεις των πινάκων είναι ο αριθμός των επαναλήψεων του i . Τα $deffd(i)$ και $Reffd(i)$ θα έχουν πλέον τις ίδιες διαστάσεις, και έτσι ισχύει ακριβώς το ίδιο και για τη ειδική απόσβεση. Με αυτόν τον τρόπο ξεπεράστηκε το πρόβλημα, οδηγώντας στους υπολογισμούς και τις γραφικές παραστάσεις που βλέπουμε στην εφαρμογή μας.

3.2.1 Εφαρμογή στα μοντέλα

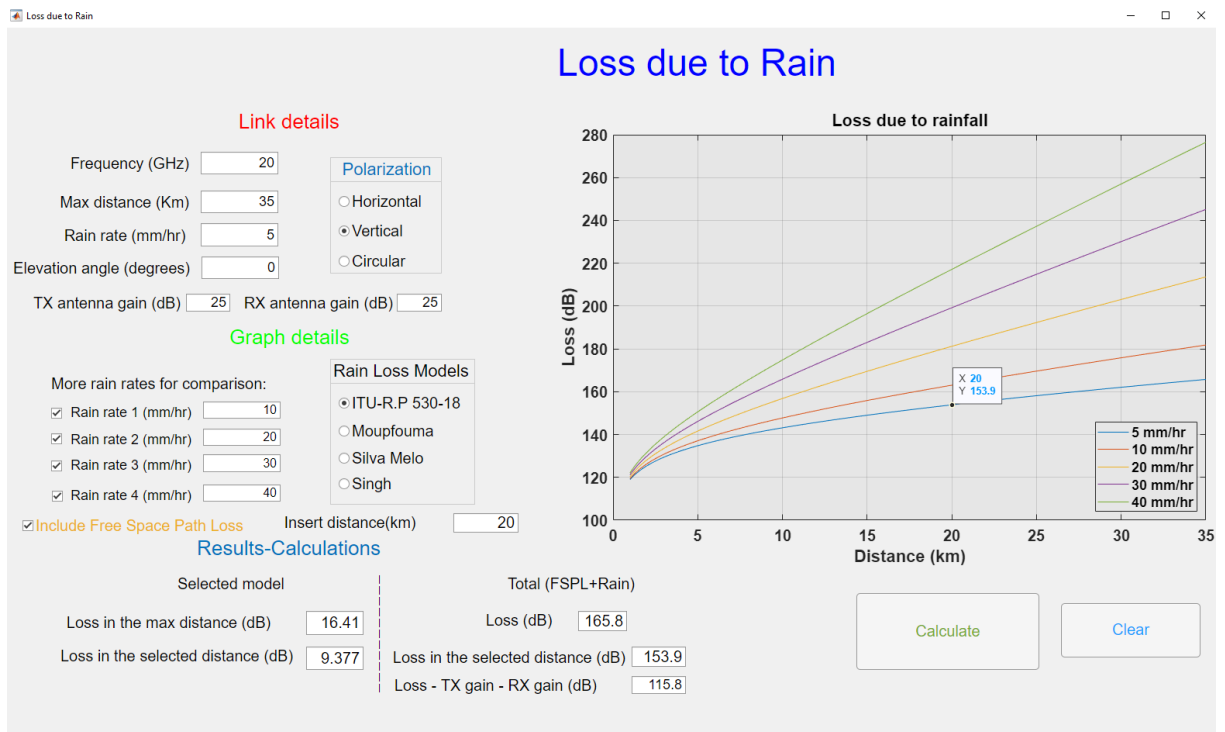
Οι γραφικές παραστάσεις που μπορεί να μας δώσει η εφαρμογή αφορούν έως και 5 διαφορετικούς ρυθμούς βροχόπτωσης. Έναν βασικό ρυθμό που δίνουμε για τους υπολογισμούς και άλλους, το πολύ, 4 για σύγκριση. Προφανώς τα αποτελέσματά μας αφορούν τις συνολικές απώλειες, δηλαδή επιλεγμένο μοντέλο και ελεύθερο χώρο, ενώ μπορούμε να δούμε και τις απώλειες λόγω βροχόπτωσης ξεχωριστά, κάτω από το πεδίο [Results-Calculations](#) και **Selected model**. Και εδώ υπάρχει η δυνατότητα του επιπλέον υπολογισμού σε οποιαδήποτε απόσταση (έως την μέγιστη) επιθυμούμε, αρκεί να εισάγουμε την τιμή αυτή στο πεδίο **Insert distance**. Τέλος, μπορούμε να πατήσουμε το κουμπί [Clear](#) που καθαρίζει όλα τα πεδία από τις τιμές τους, όπως και πριν. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού απωλειών για το οποίο έχουν επιλεγεί οι τιμές: Συχνότητα 20 GHz, μέγιστη απόσταση 35 km, ρυθμός βροχόπτωσης 5mm/hr, μηδενική γωνία ανύψωσης, επιπλέον ρυθμούς βροχόπτωσης 10,20,30 και 40 mm/hr, κέρδη κεραιών 25 dB και για τις δύο κεραίες. και έναν επιπλέον υπολογισμό στα 20 km. Θα δούμε 3 διαφορετικά σχήματα, για κάθε είδος πόλωσης ξεχωριστά.

Μοντέλο ITU-R P. 530-18

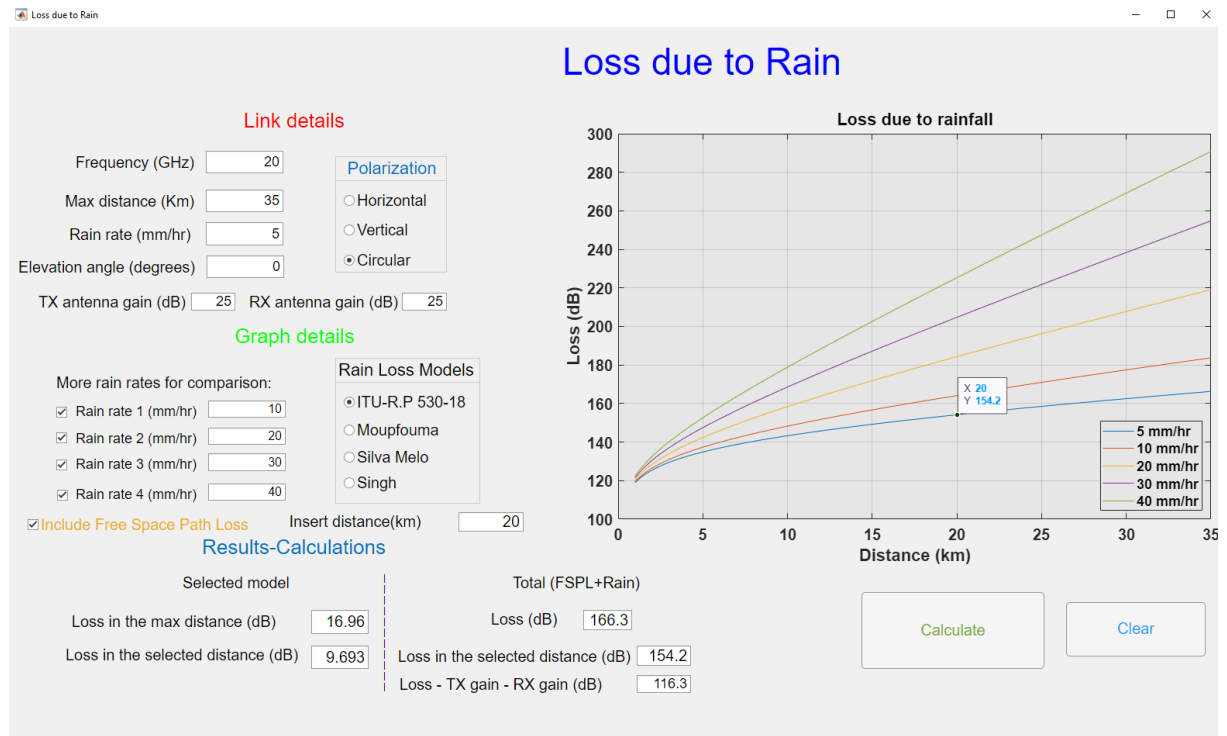
Τα αποτελέσματα που παρέχει λειτουργούν ως μέτρο σύγκρισης και μας καθοδηγούν σχετικά με την ορθότητα των υπολογισμών ή όχι.



Σχήμα 35: Συνολικές απώλειες – Οριζόντια πόλωση (ITU-R P.530-18).



Σχήμα 36: Συνολικές απώλειες – Κατακόρυφη πόλωση (ITU-R P.530-18).

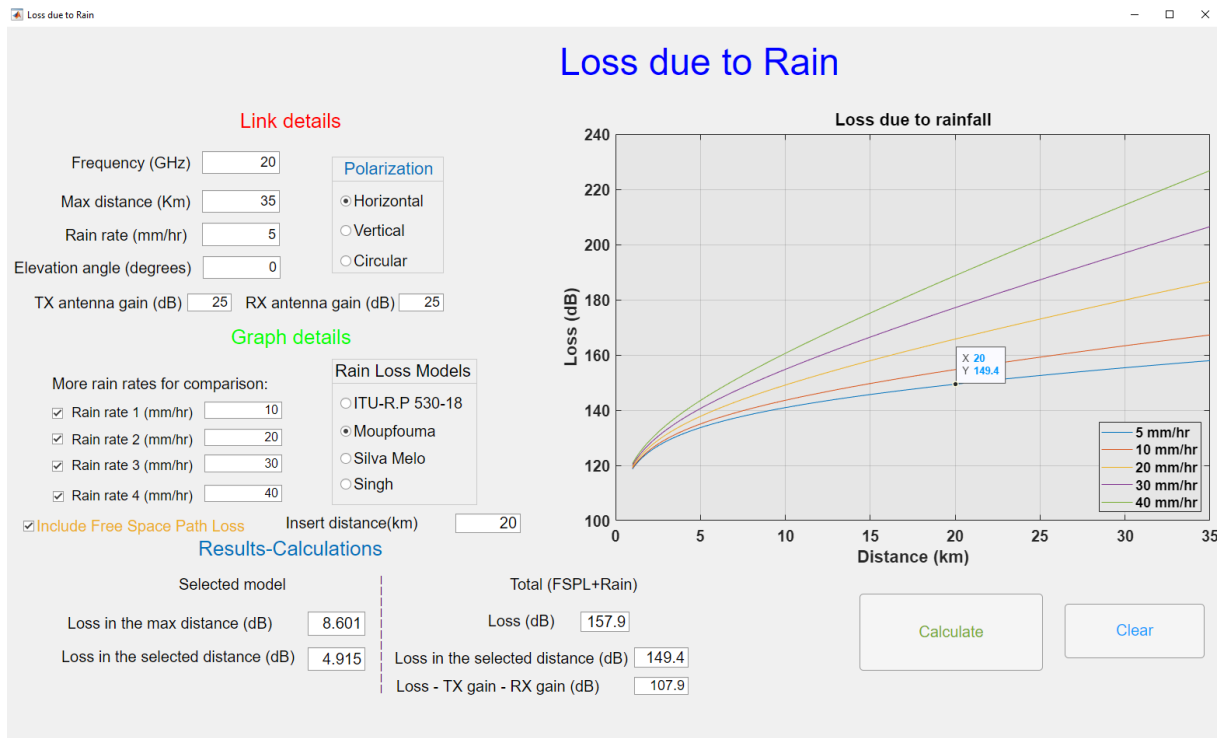


Σχήμα 37: Συνολικές απώλειες – Κυκλική πόλωση (ITU-R P.530-18).

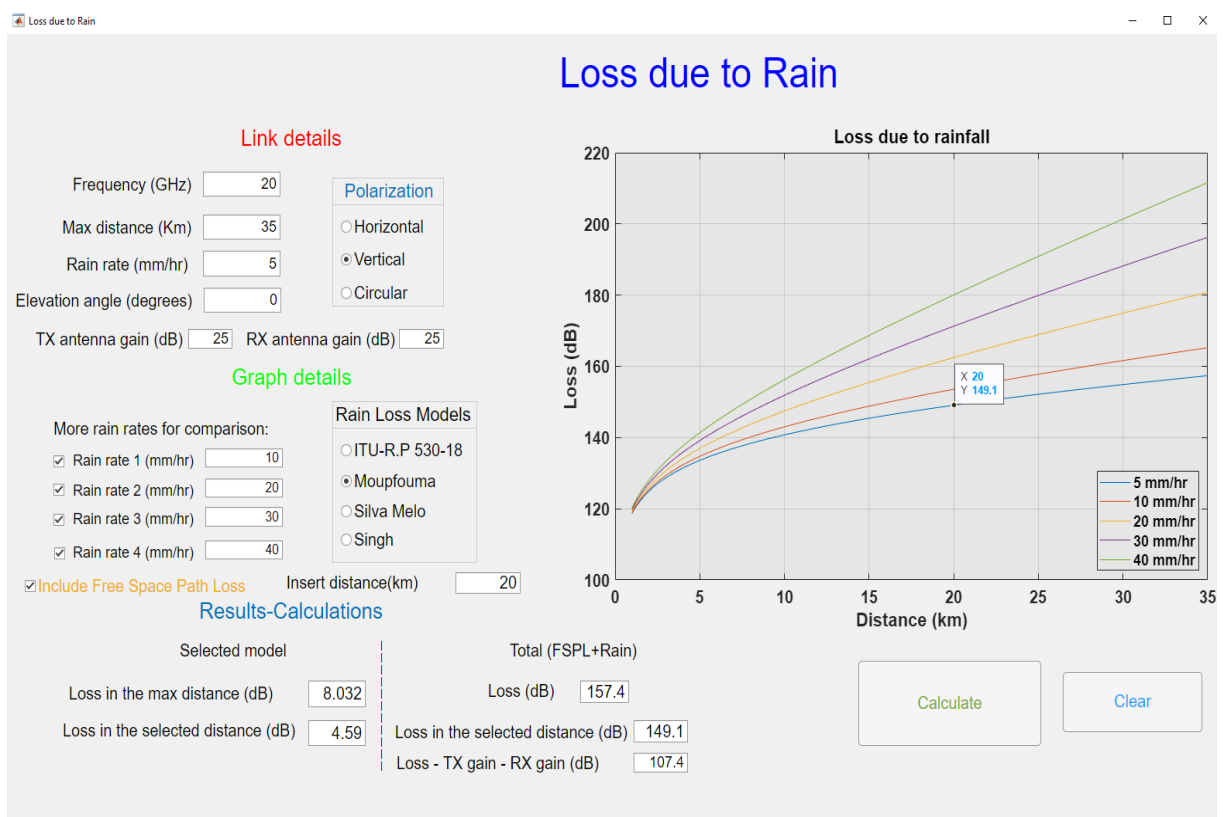
Στο υπόμνημα εντός του UIAxes βλέπουμε ποιο χρώμα αντιστοιχεί σε κάθε καμπύλη. Κάτω από το Selected model είναι οι απώλειες του μοντέλου ITU-R P.530-18, και στα δεξιά οι συνολικές απώλειες. Αφού οι συνολικές απώλειες είναι 166,3 dB και οι απώλειες λόγω βροχόπτωσης είναι 16,96 dB, οι απώλειες ελεύθερου χώρου είναι $166,3 - 16,96 = 149,3$ dB, ακριβώς όσο μας δίνει η εφαρμογή FSPL που είδαμε στην ενότητα 3.1, για τις ίδιες τιμές με του παραδείγματος. Συνολικά όμως έχουμε και τα κέρδη των κεραιών, δίνοντάς μας τελικά $166,3 - 25 - 25 = 116,3$ dB. Το ίδιο ισχύει και για την απόσταση που έχουμε επιλέξει εμείς. Στα 20 km το μοντέλο μας δίνει 9,69 dB απώλειες, συνολικά έχουμε 154,2 δηλαδή $144,51$ dB απώλειες ελεύθερου χώρου, το οποίο πάλι μπορούμε να επαληθεύσουμε τρέχοντας την εφαρμογή FSPL και βάζοντας στο πεδίο **Insert distance**, την τιμή 20.

Μοντέλο Moupfouma

Για το παράδειγμα παραπάνω έχουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την εφαρμογή μας, επιλέγοντας το μοντέλο Moupfouma όπως φαίνονται στα σχήματα 38,39 και 40. Κι εδώ έχουμε τον επιπλέον υπολογισμό στα 20 km, τα αποτελέσματα των υπολογισμών θα συζητηθούν παρακάτω, στα πλαίσια της σύγκρισης των μοντέλων μεταξύ τους.

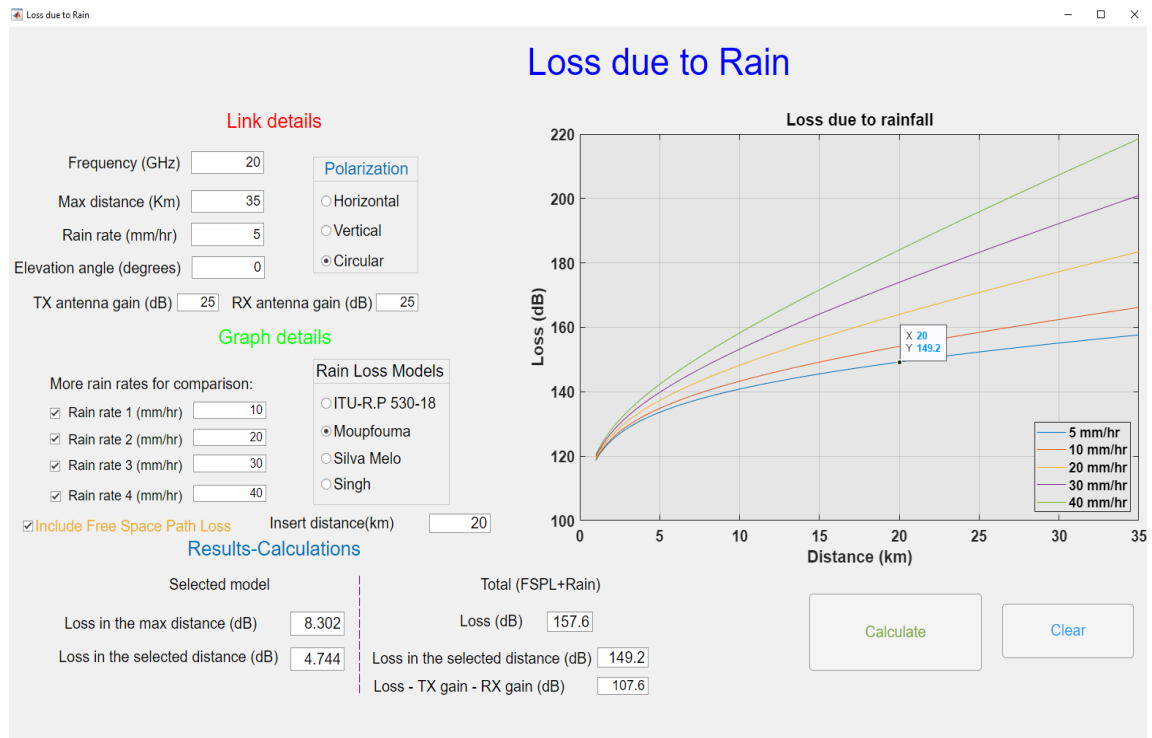


Σχήμα 38: Συνολικές απώλειες – Οριζόντια πόλωση (Moupfouma).



Σχήμα 39: Συνολικές απώλειες – Κατακόρυφη πόλωση (Moupfouma).

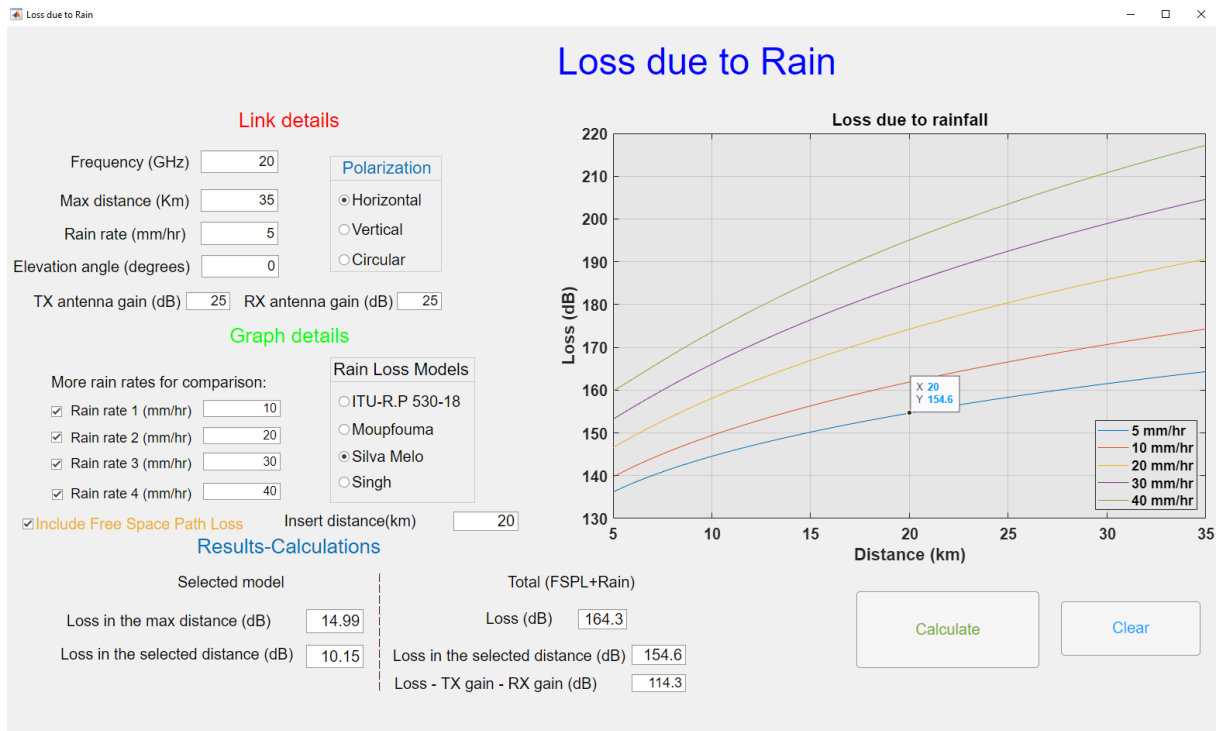
Κεφάλαιο 3



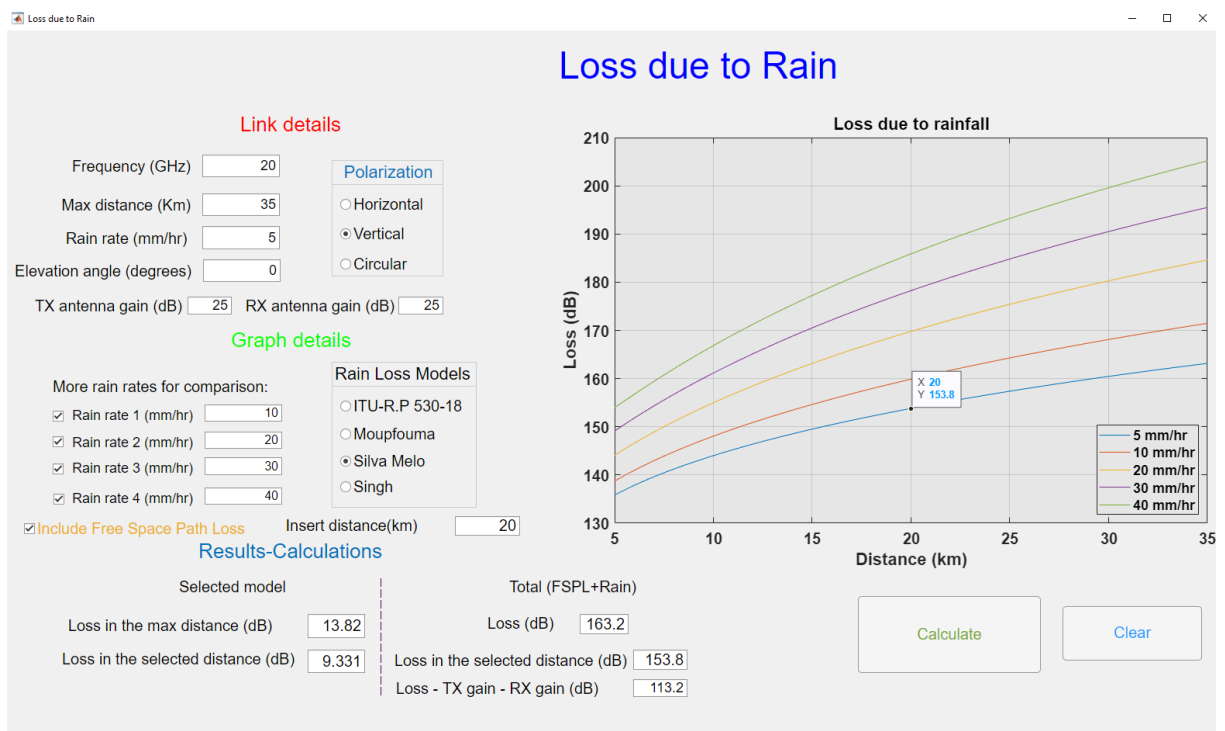
Σχήμα 40: Συνολικές απώλειες – Κυκλική πόλωση (Moupfouma).

Μοντέλο Silva Melo

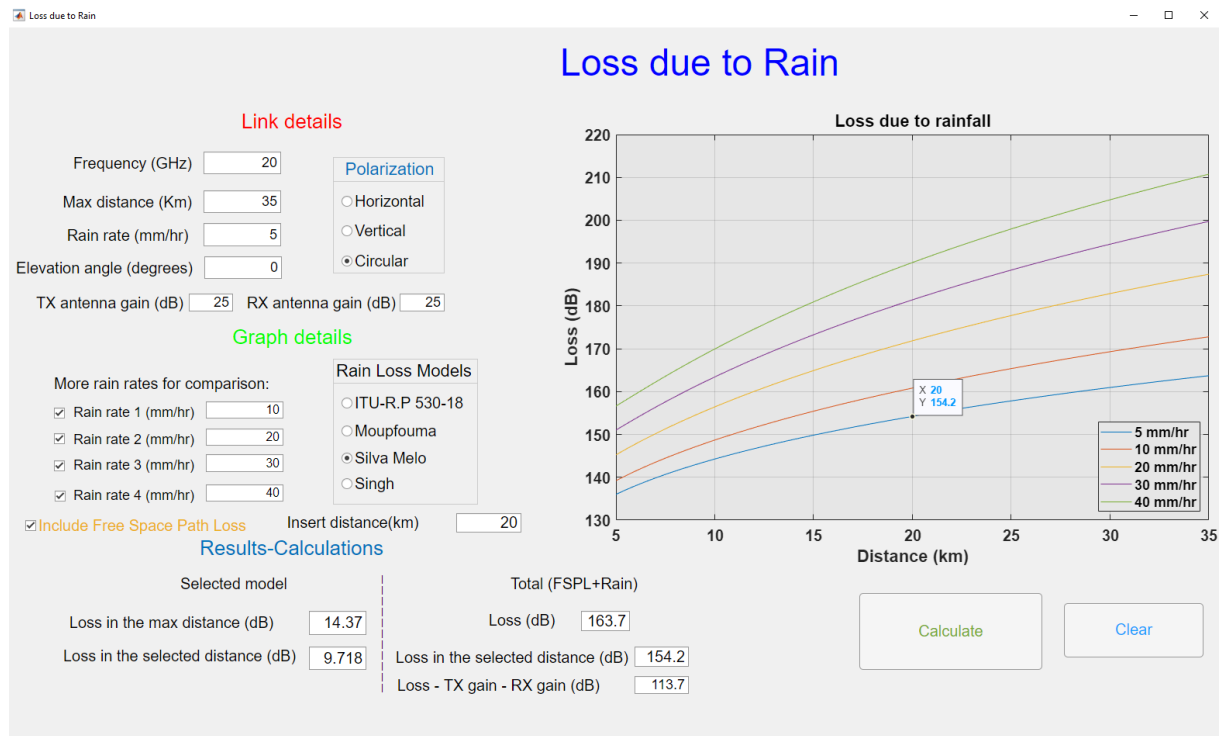
Με τον ίδιο τρόπο σκέψης προχωράμε και στο τρίτο κατά σειρά μοντέλο. Σε αυτό το σημείο πρέπει να υπενθυμίσουμε την ιδιαιτερότητα που συναντήσαμε στη μελέτη μας, όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 2.3. Οι γραφικές μας παραστάσεις ξεκινούν από τα 5 km και δεν ακολουθούν τις καμπύλες που είδαμε στα σχήματα 35 έως 40. Κάνοντας χρήση του ίδιου παραδείγματος με παραπάνω, βλέπουμε στα σχήματα 41,42 και 43 τις συνολικές απώλειες για οριζόντια, κατακόρυφη και κυκλική πόλωση αντίστοιχα:



Σχήμα 41: Συνολικές απώλειες – Οριζόντια πόλωση (Silva Melo).



Σχήμα 42: Συνολικές απώλειες – Κατακόρυφη πόλωση (Silva Melo).



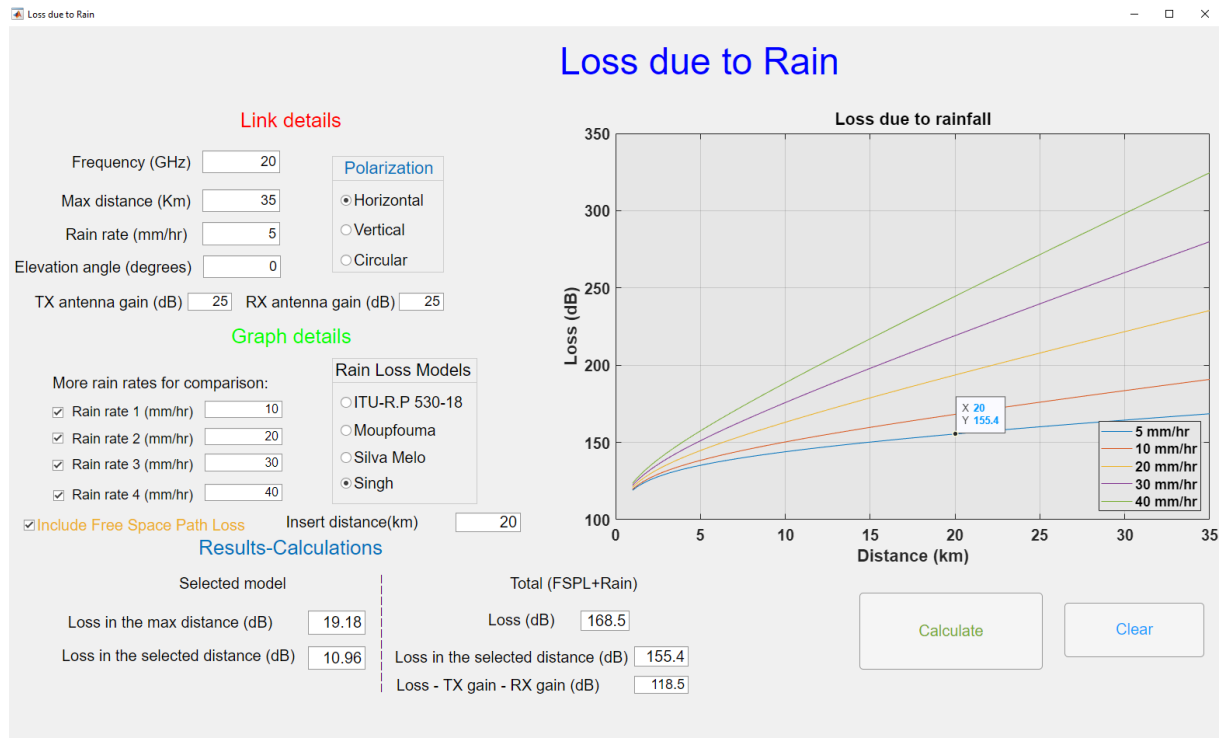
Σχήμα 43: Συνολικές απώλειες – Κυκλική πόλωση (Silva Melo).

Μοντέλο Singh

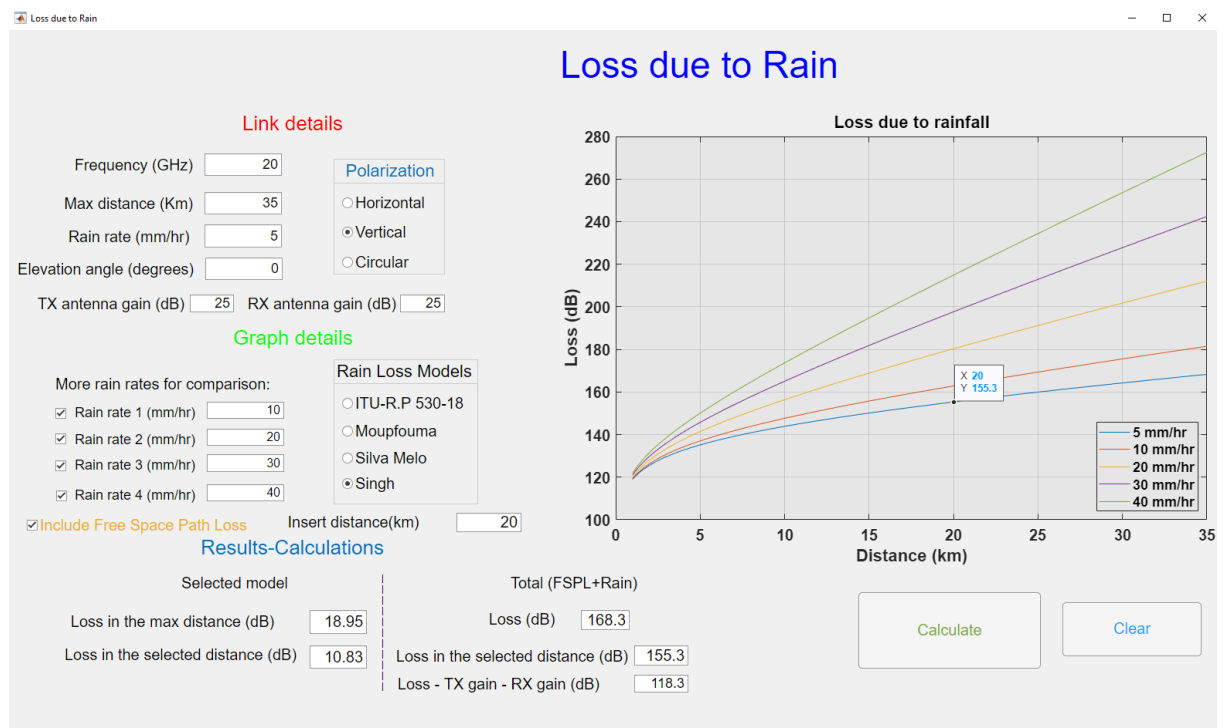
Η βασική διαφορά του μοντέλου αυτού με τα υπόλοιπα αφορά τα είδη πόλωσης των ΗΜ κυμάτων, και συγκεκριμένα το γεγονός ότι δεν εφαρμόζεται η κυκλική πόλωση. Το μοντέλο αυτό υποστηρίζει μόνο οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση, πραγματοποιεί τους αντίστοιχους υπολογισμούς και δίνει τις γραφικές παραστάσεις που ζητάμε, ενώ εάν επιλεγεί από τον χρήστη η κυκλική πόλωση θα επιστραφεί ένα μήνυμα λάθους όπως θα δούμε παρακάτω. Πίσω από το μήνυμα αυτό βρίσκεται το εξής τμήμα κώδικα:

```
elseif app.circular.Value==1;
fig = uifigure;
uialert(fig,'Circular polarization is not supported on this model','Application error');
return
end
```

Η πρώτη γραμμή δημιουργεί το παράθυρο μέσα στο οποίο θα εμφανιστεί το μήνυμα. Παίρνει την ονομασία fig, και ανοίγει ένα παράθυρο. Η εντολή uialert συντάσσεται ως uialert(όνομα παραθύρου,μήνυμα εμφάνισης,τίτλος παραθύρου). Έτσι, βλέπουμε το μήνυμα λάθους όπως φαίνεται στην εφαρμογή. Τέλος, η εντολή return ουσιαστικά θα διακόψει τον έλεγχο if-elseif, τερματίζοντας την λειτουργία της εφαρμογής. Χωρίς το return, η Matlab θα μας έδινε λάθος στον προγραμματισμό και θα τερμάτιζε ολόκληρο το πρόγραμμα. Διατηρώντας τις ίδιες τιμές του παραδείγματος με πάνω (20 GHz, 35 km, 5 mm/hr, κέρδη κεραιών 25 dB, ηδενική γωνία ανύψωσης) και για τους επιπλέον 4 ρυθμούς βροχόπτωσης, βλέπουμε στα σχήματα 44,45 και 46 τα τρία είδη πολώσεων (οριζόντια, κατακόρυφη, κυκλική-μήνυμα λάθους) αντίστοιχα:

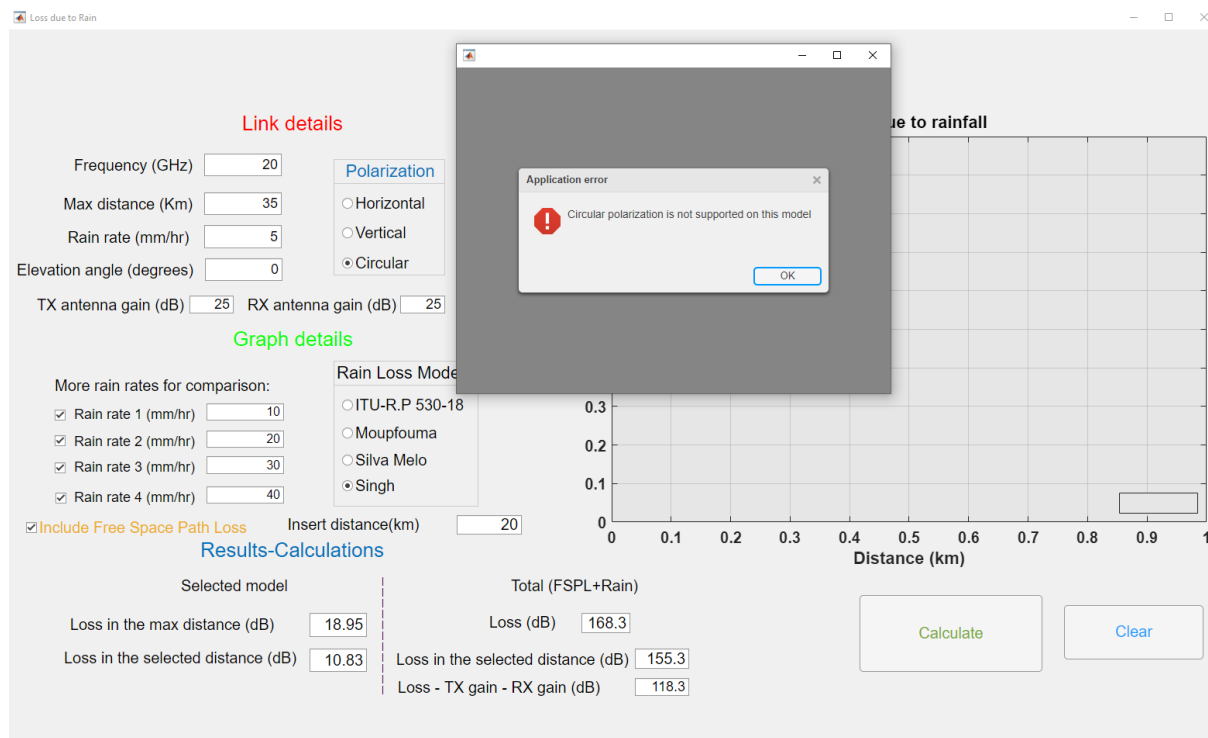


Σχήμα 44: Συνολικές απώλειες – Οριζόντια πόλωση (Singh).



Σχήμα 45: Συνολικές απώλειες – Κατακόρυφη πόλωση (Singh).

Κεφάλαιο 3

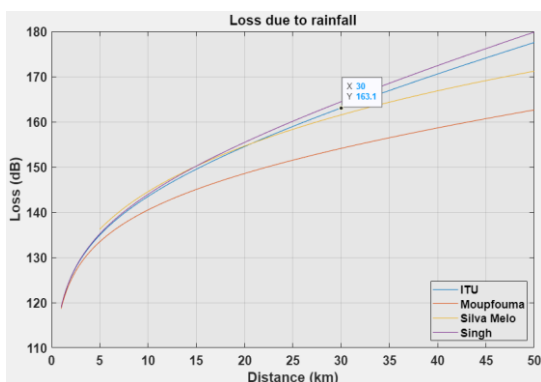


Σχήμα 46: Κυκλική πόλωση και μήνυμα λάθους.

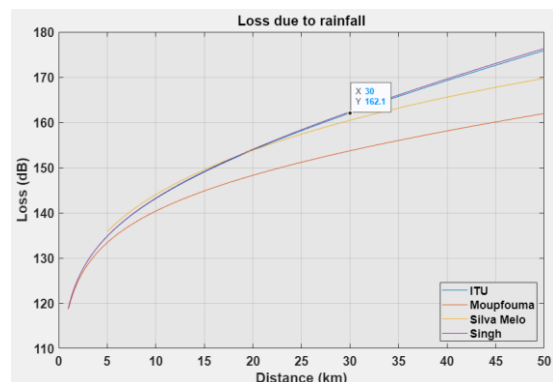
Κεφάλαιο 4ο: Συγκρίσεις - Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκαν και υλοποιήθηκαν με λογισμικό 4 διαφορετικά μοντέλα απωλειών λόγω βροχόπτωσης. Σε κάθε κεφάλαιο ασχοληθήκαμε εκτενώς με το κάθε μοντέλο ξεχωριστά, παρουσιάσαμε πολλά στοιχεία όσον αφορά τις απώλειες λόγω βροχόπτωσης και άλλων φαινομένων όπως χιόνι κλπ, και γνωρίσαμε νέες έννοιες όπως το ισοδύναμο μονοπάτι διάδοσης ή το δραστικό ρυθμό βροχόπτωσης. Αναπτύξαμε την εφαρμογή μας στο περιβάλλον Matlab, όπου εισάγοντας απλά αριθμητικά δεδομένα, μπορούμε να υπολογίζουμε απώλειες σε μεγάλες αποστάσεις καθώς και να επιλέγουμε επιπλέον ρυθμούς βροχόπτωσης ή συχνότητες. Το προηγούμενο κεφάλαιο, στο οποίο είδαμε πολλά σχήματα και υπολογισμούς, αποτελεί έναν οδηγό για τη χρήση της εφαρμογής. Η μελέτη μας επικεντρώθηκε στα αποτελέσματα που προσφέρει η εφαρμογή και οδηγήθηκε σε ορισμένες παρατηρήσεις και συμπεράσματα που θα σχολιάσουμε σε αυτό το κεφάλαιο.

Στη συνέχεια εξετάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού απωλειών, για 2 διαφορετικούς ρυθμούς βροχόπτωσης, για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση στα 30 km. Με τη χρήση του παραδείγματος αυτού θα εξηγήσουμε με πιο απλό τρόπο τις παρατηρήσεις μας. Στα σχήματα 47 και 48 θα δούμε πως επιδρά ένας μικρός ρυθμός βροχόπτωσης στις απώλειες και στα σχήματα 49 και 50 πως επιδρά ένας μεγαλύτερος ρυθμός. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού θα εντοπίσουμε τα συμπεράσματα στα οποία μας οδήγησε η μελέτη μας. Η συχνότητα που επιλέξαμε είναι τα 20 GHz. Οι ρυθμοί είναι 5 mm/hr που αποτελεί έναν μικρό ρυθμό βροχόπτωσης και 30 mm/hr που είναι ένας αρκετά μεγάλος ρυθμός και χαρακτηρίζεται από μεγάλο ετήσιο όγκο νερού. Αντίστοιχες θα είναι και οι απώλειες όπως θα δούμε. Έτσι, θα έχουμε μία πιο σφαιρική εικόνα όσον αφορά τις απώλειες σε μία περιοχή που βρέχει λίγο και σε άλλες που βρέχει περισσότερο, δηλαδή πως επηρεάζει πραγματικά η βροχή μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη. Τα σχήματα που θα δούμε σε αυτό το κεφάλαιο αφορούν τις απώλειες ελεύθερου χώρου και βροχόπτωσης μαζί, τις συνολικές απώλειες. Για τον ρυθμό βροχόπτωσης 5 mm/hr, και για τα 4 μοντέλα έχουμε το σχήμα 47 για οριζόντια πόλωση και το σχήμα 48 για κατακόρυφη:



Σχήμα 47: Οριζόντια πόλωση (20 GHz, 5mm/hr).

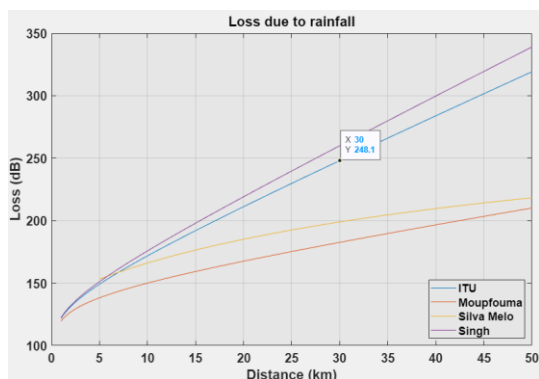


Σχήμα 48: Κατακόρυφη πόλωση (20 GHz, 5mm/hr).

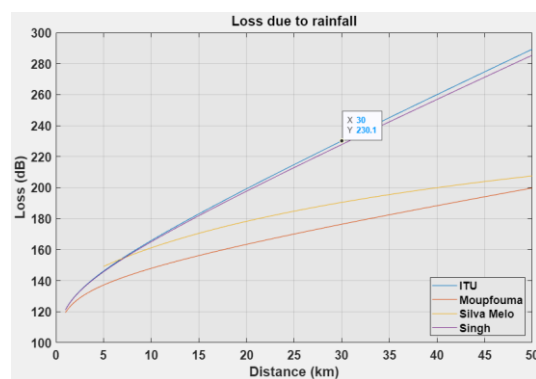
Εδώ παρατηρούμε αρχικά ότι η οριζόντια πόλωση δεν διαφέρει σημαντικά από την κατακόρυφη για τα δεδομένα του παραδείγματος. Ωστόσο, για μεγαλύτερες συχνότητες και ρυθμούς βροχόπτωσης, η οριζόντια εμφανίζει περισσότερες απώλειες. Έτσι, οι ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι πρέπει η κατακόρυφη πόλωση ΗΜ κυμάτων να προτιμάται κατά τη σχεδίαση μίας

Κεφάλαιο 4

ζεύξης [9]. Αρκετά ενδιαφέρον είναι ότι τα μοντέλα Moupfouma και Silva Melo παρουσιάζουν λιγότερες απώλειες έναντι του μοντέλου της ITU, ενώ το μοντέλο Singh παρουσιάζει περισσότερες απώλειες. Αυτό οφείλεται στην ειδική απόσβεση $A \left(\frac{dB}{km} \right)$ η οποία παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από την αντίστοιχη γ_R που χρησιμοποιεί η ITU, για συχνότητες μέχρι και 30 GHz και ρυθμούς βροχόπτωσης άνω των 10 mm/hr. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί από τις γραφικές παραστάσεις που συγκρίνουν αυτές τις δύο αποσβέσεις, στα σχήματα 21 και 22. Μετά από αυτή την συχνότητα και τον ρυθμό βροχόπτωσης, το μοντέλο παρουσιάζει λιγότερες απώλειες από της ITU. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί και μέσω της εφαρμογής μας δίνοντας ως συχνότητα μία τιμή πάνω από 30 GHz και ένα ρυθμό πάνω από 10 mm/hr, και συγκρίνοντας τις απώλειες ανάμεσα στα δύο. Τα άλλα δύο μοντέλα εμφανίζουν λιγότερες απώλειες όπως υπόσχονται σε όλο το εύρος των συχνοτήτων. Πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι σε όλους του υπολογισμούς, οι απώλειες ελεύθερου χώρου είναι ίδιες και απλώς προστίθενται σε κάθε μοντέλο, μίας και δεν μεταβάλλεται η συχνότητα ή η μέγιστη απόσταση που επηρεάζουν άμεσα τις απώλειες αυτές. Για να επιβεβαιώσουμε όσα είπαμε παραπάνω, στο σχήμα 48, στα 30 km, οι συνολικές απώλειες είναι 162,1 dB. Το σημείο αυτό φαίνεται με μία μαύρη κουκκίδα πάνω στο σχήμα 48. Από την δεύτερη εφαρμογή που αναπτύχθηκε υπολογίζουμε ότι οι απώλειες ελεύθερου χώρου είναι 148 dB, επομένως το μοντέλο εμφανίζει απώλειες 11,5 dB. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να επαληθευτεί μέσω της εφαρμογής μας, στο πεδίο **Loss in the max distance (dB)**, κάτω από τον τίτλο **Selected model**. Ακριβώς με τον ίδιο συλλογισμό προχωράμε και για τα υπόλοιπα μοντέλα, η εφαρμογή μας μπορεί να πραγματοποιεί υπολογισμούς για κάθε μοντέλο ξεχωριστά όπως και σε άλλες αποστάσεις τις οποίες επιλέγουμε εμείς. Για το ίδιο παράδειγμα και προχωρώντας και στον επόμενο ρυθμό βροχόπτωσης, των 30 mm/hr, βλέπουμε τα σχήματα 49 και 50 για τα δύο είδη πόλωσης:



Σχήμα 49: Οριζόντια πόλωση (20 GHz, 30 mm/hr).



Σχήμα 50: Κατακόρυφη πόλωση (20 GHz, 30mm/hr).

Εδώ οι διαφορές είναι πιο ξεκάθαρες. Σε όλα τα μοντέλα, η οριζόντια πόλωση εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερες απώλειες σε σχέση με την κατακόρυφη. Το μοντέλο Singh ακολουθεί της ITU, εμφανίζοντας και πάλι μεγαλύτερες απώλειες όπως αναμενόταν καθώς δεν μεταβλήθηκε η συχνότητα, αλλά ο ρυθμός βροχόπτωσης, ο οποίος δεν επηρεάζει την ειδική απόσβεση A . Για το παράδειγμά μας, στα 30 km, οι συνολικές απώλειες της τάξης των 230 dB για το μοντέλο της ITU (κατακόρυφη πόλωση) είναι δικαιολογημένες, καθώς ο ελεύθερος χώρος εμφανίζει απώλειες 148 dB, και το μοντέλο σε αυτή τη συχνότητα και ρυθμό εμφανίζει απώλειες 82,1 dB. Το ίδιο ισχύει και για το μοντέλο Singh, καθώς και για τα άλλα δύο μοντέλα. Οι αυξημένες απώλειες οφείλονται στον αρκετά μεγάλο ρυθμό βροχόπτωσης. Ο ρυθμός της τάξης των 30 mm/hr αφορά περιοχές 15° βόρεια και 15° νότια του Ισημερινού. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από το χάρτη του σχήματος 4, της παραγράφου 1.1. Επομένως, αναφέρεται σε περιοχές εντός της τροπικής ζώνης, όπου υπάρχουν άλλα

standards για τις τηλεπικοινωνίες. Στην εργασία αυτή γίνεται αναφορά για αυτόν τον ρυθμό, προκειμένου να είναι πιο ευδιάκριτες οι διαφορές ανάμεσα στις πολώσεις και στις συνολικές απώλειες.

Τελικά, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η επιλογή του μοντέλου απωλειών εξαρτάται κυρίως από τα δεδομένα που έχουμε για την τηλεπικοινωνιακή ζεύξη που μελετάμε. Ανάλογα με την συχνότητα λειτουργίας, το ρυθμό βροχόπτωσης, ακόμα και την πόλωση του ΗΜ κύματος που έχουμε, καταλήγουμε και στην επιλογή του μοντέλου που μας προσφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το μοντέλο ITU-R P.530-18 χρησιμοποιείται ευρέως από την επιστημονική κοινότητα ως βάση σύγκρισης, αναφορικά με τις απώλειες. Το μοντέλο Moupfouma παρουσιάζει τις λιγότερες απώλειες από όλα τα υπόλοιπα, εισάγοντας την έννοια του ισοδύναμου μονοπατιού διάδοσης L_{eq} , μία προσαρμοσμένη μορφή της πραγματικής απόστασης της ζεύξης. Το μοντέλο Silva Melo αποτελεί το πιο σύνθετο απ'όλα σχετικά με τους υπολογισμούς. Εισάγει τις έννοιες του δραστηκού ρυθμού βροχόπτωσης και του ενεργού μήκους διαδρομής, δύο καθαρά υπολογιστικές έννοιες και όχι υλικές, όπως η πραγματική απόσταση και ο πραγματικός ρυθμός βροχόπτωσης. Οι υπολογισμοί είναι αρκετά πιο σύνθετοι, καθιστώντας το και το δυσκολότερο στην υλοποίηση της εφαρμογής μας. Ακόμη μία πολύ βελτιωμένη έκδοχή του μοντέλου της ITU, με λιγότερες απώλειες σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων που μελετήσαμε. Έπειτα, είδαμε το μοντέλο Singh, το οποίο επηρεάζεται μόνο από τη συχνότητα και το ρυθμό βροχόπτωσης. Δεν ακολουθεί τις εξισώσεις για τον υπολογισμό των απωλειών που χρησιμοποιούν τα άλλα μοντέλα, αλλά χαρακτηρίζεται από 4 απλές εξισώσεις και ένα τελικό πολλαπλασιασμό. Με μεγάλη διαφορά είναι το απλούστερο για υπολογισμό, χωρίς σύνθετες πράξεις και με απλό αλγόριθμο 4 βημάτων όπως είδαμε στην παράγραφο 2.4.2. Για συχνότητες κάτω των 30 GHz και ρυθμό βροχόπτωσης κάτω από 10 mm/hr ακολουθεί την συμπεριφορά του μοντέλου της ITU, μετά από αυτές τις τιμές εμφανίζει λιγότερες απώλειες, και πάλι όμως μεγάλο αριθμό σε σχέση με τα μοντέλα Moupfouma και Silva Melo. Ωστόσο, η μη ύπαρξη της κυκλικής πόλωσης το περιορίζει όσον αφορά τις χρήσεις του.

Μέσω αυτής της μελέτης καταλήξαμε στα συμπεράσματα που αναφέραμε παραπάνω. Μία παρατήρηση που συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία [12],[13],[15] είναι ότι το μοντέλο ITU-R.P 530-18 εμφανίζει πολλές απώλειες, κι έτσι δεν είναι κατάλληλο για ζεύξεις σε μικρές αποστάσεις. Έχουν διατυπωθεί πολλές παρατηρήσεις και βελτιώσεις που θα μπορούσαν να απορροφηθούν από την ITU κάνοντας το μοντέλο της αρκετά πιο προσιτό για τους ερευνητές, που τείνουν πλέον να χρησιμοποιούν ή ακόμα και να αναπτύσσουν νέα μοντέλα απωλειών. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να σχεδιάζουμε ζεύξεις υψηλότερης απόδοσης, να προσφέρουμε καλύτερες υπηρεσίες και να βελτιώνουμε την ποιότητα της επικοινωνίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Met Office, “Nimbostratus clouds,” *Met Office*, 2015. [Online]. Available: <https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/clouds/mid-level-clouds/nimbostratus>.
- [2] Anne Helmenstine, “The Real Raindrop Shape Is Not a Teardrop,” *Science Notes*. Addressed: 10/11/2018 [Online]. Available: <https://sciencenotes.org/the-real-raindrop-shape-is-not-a-teardrop/>.
- [3] Recommendation ITU-R P.837-7 (06/2017): *Characteristics of precipitation for propagation modeling*.
- [4] G. E. Lempio, “Measurment of solid precipitation with an optical disdrometer,” *Advances in Geosciences*, vol.10, 2007.
- [5] ZATA, “Disdrometer & Distrometer,” ZATA, 2022. [Online]. Available: <https://www.disdrometer.com/>.
- [6] Τ. Γιούλτσης, Ε. Κριεζής, *Μικροκύματα: Θεωρία και εφαρμογές*. σελ.4-5, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021.
- [7] Αντωνίου Βανέσα, “Το φυσικό περιβάλλον,” *esxoleio*, 2010. [Online]. Available: <http://esxoleio.weebly.com/beta-epsilonnun972tauetataualpha-taomicron-phiupsilonsigmaiotakappa972-piepsilonrhoiotabeta940lambdalambdaomicronnu.html>.
- [8] Μ.Ιωαννίδου, Α. Ιωσηφίδης, “Διάδοση Ραδιοκυμάτων,” *Ασύρματες Επικοινωνίες*. ΔΙΠΑΕ, Οκτώβριος 2019.
- [9] Recommendation ITU-R P.530-18 (09/2021): *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*.
- [10] Recommendation ITU-R P.676-10 (09/2013): *Attenuation by atmospheric gases*.
- [11] George Hardesty, “Fresnel Zone: Key for Long Range WiFi Links,” *Data-alliance*, July 2020.
- [12] F.Moupfouma, “Electromagnetic Waves Attenuation due to Rain: A Prediction Model for Terrestrial or L.O.S SHF and EHF Radio Communication Links,” *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, vol. 30, pp. 622-632, Jan.2009.
- [13] L. da Silva Mello, Marlene S. Pontes, “Unified Method for the Prediction of Rain Attenuation in Satellite and Terrestrial Links,” *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 11, no. 1, June 2012.
- [14] Recommendation ITU-R P.838-3 (2005): *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*.

[15] H. Singh, V. Kumar, K. Saxena, B. Boncho, and R. Prasad, “Proposed Model for Radio Wave Attenuation due to Rain (RWAR),” *Wireless Personal Communications*, vol.115, pp.791-807, June 2020.

[16] Recommendation ITU-R P.618-8 (2003): *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB

Εφαρμογή LossCalculator.mlapp

```

if app.FreespaceButton.Value==1;
freespace
elseif app.RainfallButton.Value==1;
rainfall
end

```

Εφαρμογή freespace.mlapp

```

cla(app.UIAxes)
d=1:0.1:app.distance.Value;
loss= 32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d));
loss2= 32.44 + (20*log10(1000*(app.frequency1.Value))) + (20*log10(d));
loss3= 32.44 + (20*log10(1000*(app.frequency2.Value))) + (20*log10(d));
loss4= 32.44 + (20*log10(1000*app.frequency3.Value)) + (20*log10(d));
loss5= 32.44 + (20*log10(1000*app.frequency4.Value)) + (20*log10(d));
loss1= 32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(app.distance.Value));
plot(app.UIAxes,d,loss)
legend(app.UIAxes,sprintf('%d GHz' , app.frequency.Value),'Location','SouthEast')
if app.checkbox.Value==1;
if app.CheckBox.Value==1
plot(app.UIAxes,d,loss);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,loss2);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d GHz' , app.frequency.Value), sprintf('%d GHz' , app.frequency1.Value))
end
if app.CheckBox.Value==1 && app.CheckBox_2.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,loss);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,loss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,loss3);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d GHz' , app.frequency.Value), sprintf('%d GHz' , app.frequency1.Value), sprintf('%d GHz' , app.frequency2.Value))
end
if app.CheckBox.Value==1 && app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,loss);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,loss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,loss3);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,loss4);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d GHz' , app.frequency.Value), sprintf('%d GHz' , app.frequency1.Value), sprintf('%d GHz' , app.frequency2.Value),sprintf('%d GHz' , app.frequency3.Value))
end
if app.CheckBox.Value==1 && app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1 &&
app.CheckBox_4.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,loss);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,loss2);

```

```

        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,d,loss3);
        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,d,loss4);
        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,d,loss5);
        legend(app.UIAxes,sprintf('%d GHz' , app.frequency.Value), sprintf('%d GHz' , app.frequency1.Value), sprintf('%d
GHz' , app.frequency2.Value),sprintf('%d GHz' , app.frequency3.Value), sprintf('%d GHz' , app.frequency4.Value), 'Location','SouthEast')

    end
end

app.total.Value=loss1 -(app.TX.Value)-(app.RX.Value);
if app.distancedata.Value~=0
    lossdata= 32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(app.distancedata.Value));
    app.dbdata.Value=lossdata;
elseif app.distancedata.Value==0
    lossdata=0;
    app.dbdata.Value=lossdata;
end

```

Εφαρμογή rainfall.mlapp

```

cla(app.UIAxes)
if app.horizontal.Value==1
    kh=(-5.33980*exp(-(((log10(app.frequency.Value)+0.10008)/1.13098)^2))) + (-0.35351*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-
1.26970)/0.454)^2))) + (-0.23789*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.86036)/0.15354)^2))) + (-0.94158*exp(-
(((log10(app.frequency.Value)-0.64552)/0.16817)^2))) + (-0.18961*log10(app.frequency.Value)) + 0.71147;
    kh1=10^(kh);
    kv=(-3.80595*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.56934)/0.81061)^2))) + (-3.44965*exp(-
(((log10(app.frequency.Value)+0.22911)/0.51059)^2))) + (-0.39902*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.73042)/0.11899)^2))) +
(0.50167*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.07319)/0.27195)^2))) + (-0.16398*log10(app.frequency.Value)) + 0.63297;
    kv1=10^(kv);
    k=(kh1+kv1+((kh1-kv1)*((cosd(app.tiltangle.Value))^2)*cosd(0)))/2;
    ah=(-0.14318*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.82442)/(-0.55187))^2))) + (0.29591*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-
0.77564)/0.19822)^2))) + (0.32177*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.63773)/0.13164)^2))) + (-5.37610*exp(-
(((log10(app.frequency.Value)+0.96230)/1.47828)^2))) + (16.1721*exp(-(((log10(app.frequency.Value)+3.29980)/3.43990)^2))) +
(0.67849*log10(app.frequency.Value)) - 1.95537;
    av=(-0.07771*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-2.33840)/(-0.76284))^2))) + (0.56727*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-
0.95545)/0.54039)^2))) + (-0.20238*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.14520)/0.26809)^2))) + (-48.2991*exp(-
(((log10(app.frequency.Value)-0.791669)/0.116226)^2))) + (48.5833*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.791459)/0.116479)^2))) + (-
0.053739*log10(app.frequency.Value)) + 0.83433;
    a=((kh1*ah)+(kv1*av)+((kh1*ah)-(kv1*av))*((cosd(app.tiltangle.Value))^2)*cosd(0))/(2*k);
elseif app.vertical.Value==1
    kh=(-5.33980*exp(-(((log10(app.frequency.Value)+0.10008)/1.13098)^2))) + (-0.35351*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-
1.26970)/0.454)^2))) + (-0.23789*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.86036)/0.15354)^2))) + (-0.94158*exp(-
(((log10(app.frequency.Value)-0.64552)/0.16817)^2))) + (-0.18961*log10(app.frequency.Value)) + 0.71147;
    kh1=10^(kh);
    kv=(-3.80595*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.56934)/0.81061)^2))) + (-3.44965*exp(-
(((log10(app.frequency.Value)+0.22911)/0.51059)^2))) + (-0.39902*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.73042)/0.11899)^2))) +
(0.50167*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.07319)/0.27195)^2))) + (-0.16398*log10(app.frequency.Value)) + 0.63297;
    kv1=10^(kv);
    k=(kh1+kv1+((kh1-kv1)*((cosd(app.tiltangle.Value))^2)*cosd(2*90)))/2;
    ah=(-0.14318*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.82442)/(-0.55187))^2))) + (0.29591*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-
0.77564)/0.19822)^2))) + (0.32177*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.63773)/0.13164)^2))) + (-5.37610*exp(-
(((log10(app.frequency.Value)+0.96230)/1.47828)^2))) + (16.1721*exp(-(((log10(app.frequency.Value)+3.29980)/3.43990)^2))) +
(0.67849*log10(app.frequency.Value)) - 1.95537;

```

Κεφάλαιο 4

```
av=(-0.07771*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-2.33840)/(-0.76284))^2))) + (0.56727*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.95545)/0.54039)^2))) + (-0.20238*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.14520)/0.26809)^2))) + (-48.2991*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.791669)/0.116226)^2))) + (48.5833*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.791459)/0.116479)^2))) + (-0.053739*log10(app.frequency.Value)) + 0.83433;
a=((kh1*ah)+(kv1*av)+((kh1*ah)-(kv1*av))*((cosd(app.tiltangle.Value))^2)*cosd(2*90)))/(2*k);
elseif app.circular.Value==1
kh=(-5.33980*exp(-(((log10(app.frequency.Value)+0.10008)/1.13098)^2))) + (-0.35351*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.26970)/0.454)^2))) + (-0.23789*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.86036)/0.15354)^2))) + (-0.94158*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.64552)/0.16817)^2))) + (-0.18961*log10(app.frequency.Value)) + 0.71147;
kh1=10^(kh);
ah=(-0.14318*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.82442)/(-0.55187))^2))) + (0.29591*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.77564)/0.19822)^2))) + (0.32177*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.63773)/0.13164)^2))) + (-5.37610*exp(-(((log10(app.frequency.Value)+0.96230)/1.47828)^2))) + (16.1721*exp(-(((log10(app.frequency.Value)+3.29980)/3.43990)^2))) + (0.67849*log10(app.frequency.Value)) - 1.95537;
kv=(-3.80595*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.56934)/0.81061)^2))) + (-3.44965*exp(-(((log10(app.frequency.Value)+0.22911)/0.51059)^2))) + (-0.39902*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.73042)/0.11899)^2))) + (0.50167*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.07319)/0.27195)^2))) + (-0.16398*log10(app.frequency.Value)) + 0.63297;
kv1=10^(kv);
av=(-0.07771*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-2.33840)/(-0.76284))^2))) + (0.56727*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.95545)/0.54039)^2))) + (-0.20238*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-1.14520)/0.26809)^2))) + (-48.2991*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.791669)/0.116226)^2))) + (48.5833*exp(-(((log10(app.frequency.Value)-0.791459)/0.116479)^2))) + (-0.053739*log10(app.frequency.Value)) + 0.83433;
k=(kh1+kv1+((kh1-kv1)*((cosd(app.tiltangle.Value))^2)*cosd(2*45)))/2;
a=((kh1*ah)+(kv1*av)+((kh1*ah)-(kv1*av))*((cosd(app.tiltangle.Value))^2)*cosd(2*45)))/(2*k);
end
if app.ITU.Value==1;
cla(app.UIAxes)
d=1:0.1:app.distance.Value;
g= k*(app.rain_rate.Value)^a;
lossr=g*app.distance.Value;
lossdata=g*(app.distancedata.Value);
lossplot=g*d;
totalloss= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + ( (k*(app.rain_rate.Value)^a)*d));
totalloss2= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + ( (k*(app.rain_rate_2.Value)^a)*d));
totalloss3= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + ( (k*(app.rain_rate_3.Value)^a)*d));
totalloss4= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + ( (k*(app.rain_rate_4.Value)^a)*d));
totalloss5= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + ( (k*(app.rain_rate_5.Value)^a)*d));
app.loss.Value=lossr;
app.lossdata.Value=lossdata;

plot(app.UIAxes,d,lossplot);
if app.CheckBox_1.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)

apwleiesfs_itu= (32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(app.distance.Value))) + (
(k*(app.rain_rate.Value)^a)*app.distance.Value) ;
app.total.Value=apwleiesfs_itu;
if app.RX.Value~=0 || app.TX.Value~=0
app.total2.Value=apwleiesfs_itu - app.TX.Value - app.RX.Value;
end
lossdatatotal=lossdata+(32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(app.distancedata.Value)));
```

```

app.lossdatatotal.Value=lossdatatotal;
if app.CheckBox_2.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value))
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss3);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value), 'Location','SouthEast');
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1 && app.CheckBox_4.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss3);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss4);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value),sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_4.Value),'Location','SouthEast');
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1 && app.CheckBox_4.Value==1 && app.CheckBox_5.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss3);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss4);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss5);
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_4.Value),sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_5.Value),'Location','SouthEast');
end
end
elseif app.Moupfouma.Value==1;
cla(app.UIAxes)
d=1:0.1:app.distance.Value;
Leq=0:app.distance.Value;
zl=-100:100;
g= k*(app.rain_rate.Value)^a;

```

Κεφάλαιο 4

```
if app.distance.Value<=7;
zl=-100;
elseif app.distance.Value>7;
zl=(44.2/app.distance.Value)^0.78;
end
Leq=(app.distance.Value)*(exp((-app.rain_rate.Value)/(1+(zl*app.rain_rate.Value))));
Leqdata=(app.distancedata.Value)*(exp((-app.rain_rate.Value)/(1+(zl*app.rain_rate.Value))));
Leqd=d*(exp((-app.rain_rate.Value)/(1+(zl*app.rain_rate.Value))));
lossMouplot=g*Leqd;
totalloss=((32.44+(20*log10(1000*app.frequency.Value)))+(20*log10(d)))+(k*(app.rain_rate.Value)^a*Leqd);
totalloss2=((32.44+(20*log10(1000*app.frequency.Value)))+(20*log10(d)))+(k*(app.rain_rate_2.Value)^a*Leqd);
totalloss3=((32.44+(20*log10(1000*app.frequency.Value)))+(20*log10(d)))+(k*(app.rain_rate_3.Value)^a*Leqd);
totalloss4=((32.44+(20*log10(1000*app.frequency.Value)))+(20*log10(d)))+(k*(app.rain_rate_4.Value)^a*Leqd);
totalloss5=((32.44+(20*log10(1000*app.frequency.Value)))+(20*log10(d)))+(k*(app.rain_rate_5.Value)^a*Leqd);
lossMoupfouma=Leq*g;
app.loss.Value=lossMoupfouma;
lossdata=Leqdata*g;
app.lossdata.Value=lossdata;
plot(app.UIAxes,d,lossMouplot)
if app.CheckBox_1.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
apwleiesfs_mou=(32.44+(20*log10(1000*app.frequency.Value)))+(20*log10(app.distance.Value)))+(k*(app.rain_rate.Value)^a*Leq);
;
app.total.Value=apwleiesfs_mou;
if app.RX.Value~=0 || app.TX.Value~=0
app.total2.Value=apwleiesfs_mou- app.TX.Value - app.RX.Value;
end
lossdatatotal=lossdata+(32.44+(20*log10(1000*app.frequency.Value)))+(20*log10(app.distancedata.Value));
app.lossdatatotal.Value=lossdatatotal;
if app.CheckBox_2.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr', app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr', app.rain_rate_2.Value))
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss3);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr', app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr', app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr', app.rain_rate_3.Value), 'Location','SouthEast');
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1 && app.CheckBox_4.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
```

```

hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss3);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss4);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value),sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_4.Value),'Location','SouthEast');
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1 && app.CheckBox_4.Value==1 && app.CheckBox_5.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss3);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss4);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss5);
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_4.Value),sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_5.Value),'Location','SouthEast');
end
end
elseif app.SilvaMelo.Value==1;
cla(app.UIAxes)
d=1:0.1:100;
deff=1:200;
Reff=0:100;
deffd=1:991;
Reffd=1:991;
g1d=1:991;
deffd=1:app.distance.Value;
Reffd=1:app.distance.Value;
g1d=1:app.distance.Value;
deff=(app.distance.Value)/(1+((app.distance.Value)/(119*app.rain_rate.Value^(-0.224))));
Reff=1.763*((app.rain_rate.Value)^(0.735+(0.917/app.distance.Value)));
if app.distancedata.Value~=0
deffd=(app.distancedata.Value)/(1+((app.distancedata.Value)/(119*app.rain_rate.Value^(-0.224))));
Reffd=1.763*((app.rain_rate.Value)^(0.735+(0.917/app.distancedata.Value)));
g1data=k*(Reffd)^a;
else
g1data=0;
deffd=0;
Reffd=0;
app.lossdatatotal.Value=0;
end
lossSilva=(k*(Reff)^a)*deff;
app.loss.Value=lossSilva;
i=1;
for d0=5:0.1:app.distance.Value
deffd(i)=(d0)/(1+((d0)/(119*app.rain_rate.Value^(-0.224))));
Reffd(i)=1.763*((app.rain_rate.Value)^(0.735+(0.917/d0)));
g1d(i)=((Reffd(i)).^a)*k;
i=i+1;

```

Κεφάλαιο 4

end

```
lossSilvaplot=g1d.*deffd;
d=5:0.1:app.distance.Value;
plot(app.UIAxes,d,lossSilvaplot)
lossdata=g1data*deffddata;
app.lossdata.Value=lossdata;
i=1;
for d0_2=5:0.1:app.distance.Value
    deffd_2(i)=(d0_2)/(1+((d0_2)/(119*app.rain_rate_2.Value^(-0.224))));
    Reffd_2(i)=1.763*((app.rain_rate_2.Value)^(0.735+(0.917/d0_2)));
    g1d_2(i)=(Reffd_2(i)).^a*k;
    i=i+1;
end
i=1;
for d0_3=5:0.1:app.distance.Value
    deffd_3(i)=(d0_3)/(1+((d0_3)/(119*app.rain_rate_3.Value^(-0.224))));
    Reffd_3(i)=1.763*((app.rain_rate_3.Value)^(0.735+(0.917/d0_3)));
    g1d_3(i)=(Reffd_3(i)).^a*k;
    i=i+1;
end
i=1;
for d0_4=5:0.1:app.distance.Value
    deffd_4(i)=(d0_4)/(1+((d0_4)/(119*app.rain_rate_4.Value^(-0.224))));
    Reffd_4(i)=1.763*((app.rain_rate_4.Value)^(0.735+(0.917/d0_4)));
    g1d_4(i)=(Reffd_4(i)).^a*k;
    i=i+1;
end
i=1;
for d0_5=5:0.1:app.distance.Value
    deffd_5(i)=(d0_5)/(1+((d0_5)/(119*app.rain_rate_5.Value^(-0.224))));
    Reffd_5(i)=1.763*((app.rain_rate_5.Value)^(0.735+(0.917/d0_5)));
    g1d_5(i)=(Reffd_5(i)).^a*k;
    i=i+1;
end
totaloss2= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + (g1d_2.*deffd_2));
totaloss3= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + (g1d_3.*deffd_3));
totaloss4= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + (g1d_4.*deffd_4));
totaloss5= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + (g1d_5.*deffd_5));
if app.CheckBox_1.Value==1
    cla(app.UIAxes)
    apwleiesSilva_fs= (32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(app.distance.Value))) + (k*(Reff)^a)*deff ;
    app.total.Value=apwleiesSilva_fs;
    if app.RX.Value~=0 || app.TX.Value~=0
        app.total2.Value=apwleiesSilva_fs- app.TX.Value - app.RX.Value;
    end
end
totalloss= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + (g1d.*deffd));
lossdatatotal=lossdata+(32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(app.distancedata.Value)));
app.lossdatatotal.Value=lossdatatotal;
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
if app.CheckBox_2.Value==1
    cla(app.UIAxes)
    plot(app.UIAxes,d,totalloss)
```

```

hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value))
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss3);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value), 'Location','SouthEast');
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1 && app.CheckBox_4.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss3);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss4);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value),sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_4.Value),'Location','SouthEast');
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1 && app.CheckBox_4.Value==1 && app.CheckBox_5.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,d,totalloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss3);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss4);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,d,totalloss5);
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_4.Value),sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_5.Value),'Location','SouthEast');
end
end
elseif app.Singh.Value==1;
cla(app.UIAxes)
if app.horizontal.Value==1
a1=(1.422*10^(-9))*((app.rain_rate.Value)^2) + ((2.03*10^(-7))*app.rain_rate.Value) - (1.21*10^(-5));
b1=-((1.963*10^(-7))*((app.rain_rate.Value)^2) + ((8.618*10^(-5))*app.rain_rate.Value) - 0.0019);
c1=(2.114*10^(-6))*((app.rain_rate.Value)^2) + (0.01*app.rain_rate.Value) - 0.036;
d1=(3*10^(-5))*((app.rain_rate.Value)^2) - (0.040*app.rain_rate.Value) - 0.031
elseif app.vertical.Value==1
a1=(-5.520*10^(-12))*((app.rain_rate.Value)^3) + (3.26*10^(-9))*((app.rain_rate.Value)^2) - (1.21*(app.rain_rate.Value*10^(-7))) -
(6*10^(-6));

```

Κεφάλαιο 4

```
b1=(8*10^(-10))*((app.rain_rate.Value)^3) - (4.552*10^(-7))*((app.rain_rate.Value)^2) - (3.03*(app.rain_rate.Value*10^(-5))) + 0.001;
c1=(-5.71*10^(-9))*((app.rain_rate.Value)^3) + (6*10^(-7))*((app.rain_rate.Value)^2) + (8.707*(app.rain_rate.Value*10^(-3))) - 0.018;
d1=(-1.073*10^(-7))*((app.rain_rate.Value)^3) + (1.068*10^(-4))*((app.rain_rate.Value)^2) - (0.0598*app.rain_rate.Value) + 0.0442;
elseif app.circular.Value==1;
fig = uifigure;
uialert(fig,'Circular polarization is not supported on this model','Application error');
return
end
A=(a1*((app.frequency.Value)^3)) + (b1*((app.frequency.Value)^2)) + (c1*app.frequency.Value) + d1;
lossSingh= A*app.distance.Value;
lossdata=A*app.distancedata.Value;
app.lossdata.Value=lossdata;
app.loss.Value=lossSingh;
dplot=1:0.1:app.distance.Value;
d=1:0.1:app.distance.Value;
lossSinghplot=A*dplot;
plot(app.UIAxes,dplot,lossSinghplot)
if app.CheckBox_1.Value==1
cla(app.UIAxes)
lossdatatotal=lossdata+(32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(app.distancedata.Value)));
app.lossdatatotal.Value=lossdatatotal;
if app.horizontal.Value==1
a2=(1.422*10^(-9))*((app.rain_rate_2.Value)^2) + ((2.03*10^(-7))*app.rain_rate_2.Value) - (1.21*10^(-5));
b2=-((1.963*10^(-7))*((app.rain_rate_2.Value)^2) + ((8.618*10^(-5))*app.rain_rate_2.Value) - 0.0019);
c2=(2.114*10^(-6))*((app.rain_rate_2.Value)^2) + (0.01*app.rain_rate_2.Value) - 0.036;
d2=(3*10^(-5))*((app.rain_rate_2.Value)^2) - (0.04*app.rain_rate_2.Value) - 0.031;
elseif app.vertical.Value==1
a2=(-5.520*10^(-12))*((app.rain_rate_2.Value)^3) + (3.26*10^(-9))*((app.rain_rate_2.Value)^2) - 1.21*(app.rain_rate_2.Value*10^(-7)) - (6*10^(-6));
b2=(8*10^(-10))*((app.rain_rate_2.Value)^3) - (4.552*10^(-7))*((app.rain_rate_2.Value)^2) - 3.03*(app.rain_rate_2.Value*10^(-5)) + 0.001;
c2=(-5.71*10^(-9))*((app.rain_rate_2.Value)^3) + (6*10^(-7))*((app.rain_rate_2.Value)^2) + 8.07*(app.rain_rate_2.Value*10^(-3)) - 0.018;
d2=(-1.073*10^(-7))*((app.rain_rate_2.Value)^3) + (1.068*10^(-4))*((app.rain_rate_2.Value)^2) - (0.0598*app.rain_rate_2.Value) + 0.0442;
end
A2=(a2*((app.frequency.Value)^3)) + (b2*((app.frequency.Value)^2)) + c2*app.frequency.Value + d2;
if app.horizontal.Value==1
a3=(1.422*10^(-9))*((app.rain_rate_3.Value)^2) + ((2.03*10^(-7))*app.rain_rate_3.Value) - (1.21*10^(-5));
b3=-((1.963*10^(-7))*((app.rain_rate_3.Value)^2) + ((8.618*10^(-5))*app.rain_rate_3.Value) - 0.0019);
c3=(2.114*10^(-6))*((app.rain_rate_3.Value)^2) + (0.01*app.rain_rate_3.Value) - 0.036;
d3=(3*10^(-5))*((app.rain_rate_3.Value)^2) - (0.04*app.rain_rate_3.Value) - 0.031;
elseif app.vertical.Value==1
a3=(-5.520*10^(-12))*((app.rain_rate_3.Value)^3) + (3.26*10^(-9))*((app.rain_rate_3.Value)^2) - 1.21*(app.rain_rate_3.Value*10^(-7)) - (6*10^(-6));
b3=(8*10^(-10))*((app.rain_rate_3.Value)^3) - (4.552*10^(-7))*((app.rain_rate_3.Value)^2) - 3.03*(app.rain_rate_3.Value*10^(-5)) + 0.001;
c3=(-5.71*10^(-9))*((app.rain_rate_3.Value)^3) + (6*10^(-7))*((app.rain_rate_3.Value)^2) + 8.07*(app.rain_rate_3.Value*10^(-3)) - 0.018;
d3=(-1.073*10^(-7))*((app.rain_rate_3.Value)^3) + (1.068*10^(-4))*((app.rain_rate_3.Value)^2) - (0.0598*app.rain_rate_3.Value) + 0.0442;
end
A3=(a3*((app.frequency.Value)^3)) + (b3*((app.frequency.Value)^2)) + c3*app.frequency.Value + d3;
if app.horizontal.Value==1
a4=(1.422*10^(-9))*((app.rain_rate_4.Value)^2) + ((2.03*10^(-7))*app.rain_rate_4.Value) - (1.21*10^(-5));
b4=-((1.963*10^(-7))*((app.rain_rate_4.Value)^2) + ((8.618*10^(-5))*app.rain_rate_4.Value) - 0.0019);
```

```

c4=(2.114*10^(-6))*((app.rain_rate_4.Value)^2) + (0.01*app.rain_rate_4.Value) - 0.036;
d4=(3*10^(-5))*((app.rain_rate_4.Value)^2) - (0.04*app.rain_rate_4.Value) - 0.031;
elseif app.vertical.Value==1
a4=(-5.520*10^(-12))*((app.rain_rate_4.Value)^3) + (3.26*10^(-9))*((app.rain_rate_4.Value)^2) - 1.21*(app.rain_rate_4.Value*10^(-7)) -
(6*10^(-6));
b4=(8*10^(-10))*((app.rain_rate_4.Value)^3) - (4.552*10^(-7))*((app.rain_rate_4.Value)^2) - 3.03*(app.rain_rate_4.Value*10^(-5)) +
0.001;
c4=(-5.71*10^(-9))*((app.rain_rate_4.Value)^3) + (6*10^(-7))*((app.rain_rate_4.Value)^2) + 8.07*(app.rain_rate_4.Value*10^(-3)) - 0.018;
d4=(-1.073*10^(-7))*((app.rain_rate_4.Value)^3) + (1.068*10^(-4))*((app.rain_rate_4.Value)^2) - (0.0598*app.rain_rate_4.Value) +
0.0442;
end
A4=(a4*((app.frequency.Value)^3)) + (b4*((app.frequency.Value)^2)) + c4*app.frequency.Value + d4;
if app.horizontal.Value==1
a5=(1.422*10^(-9))*((app.rain_rate_5.Value)^2) + ((2.03*10^(-7))*app.rain_rate_5.Value) - (1.21*10^(-5));
b5=-((1.963*10^(-7))*((app.rain_rate_5.Value)^2) + ((8.618*10^(-5))*app.rain_rate_5.Value) - 0.0019);
c5=(2.114*10^(-6))*((app.rain_rate_5.Value)^2) + (0.01*app.rain_rate_5.Value) - 0.036;
d5=(3*10^(-5))*((app.rain_rate_5.Value)^2) - (0.04*app.rain_rate_5.Value) - 0.031;
elseif app.vertical.Value==1
a5=(-5.520*10^(-12))*((app.rain_rate_5.Value)^3) + (3.26*10^(-9))*((app.rain_rate_5.Value)^2) - 1.21*(app.rain_rate_5.Value*10^(-7)) -
(6*10^(-6));
b5=(8*10^(-10))*((app.rain_rate_5.Value)^3) - (4.552*10^(-7))*((app.rain_rate_5.Value)^2) - 3.03*(app.rain_rate_5.Value*10^(-5)) +
0.001;
c5=(-5.71*10^(-9))*((app.rain_rate_5.Value)^3) + (6*10^(-7))*((app.rain_rate_5.Value)^2) + 8.07*(app.rain_rate_5.Value*10^(-3)) - 0.018;
d5=(-1.073*10^(-7))*((app.rain_rate_5.Value)^3) + (1.068*10^(-4))*((app.rain_rate_5.Value)^2) - (0.0598*app.rain_rate_5.Value) +
0.0442;
end
A5=(a5*((app.frequency.Value)^3)) + (b5*((app.frequency.Value)^2)) + c5*app.frequency.Value + d5;
totaloss2= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + (A2*dplot));
totaloss3= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + (A3*dplot));
totaloss4= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + (A4*dplot));
totaloss5= ((32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + (A5*dplot));
apwleiesfs_Singh= (32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(app.distance.Value))) + lossSingh ;
totaloss= (32.44 + (20*log10(1000*app.frequency.Value)) + (20*log10(d))) + A*dplot ;
app.total.Value=apwleiesfs_Singh;
if app.RX.Value~=0 || app.TX.Value~=0
app.total2.Value=apwleiesfs_Singh- app.TX.Value - app.RX.Value;
end
plot(app.UIAxes,dplot,totaloss)
if app.CheckBox_2.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,dplot,totaloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,dplot,totaloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value))
end
if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1
cla(app.UIAxes)
plot(app.UIAxes,dplot,totaloss)
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,dplot,totaloss2);
hold(app.UIAxes,"on");
plot(app.UIAxes,dplot,totaloss3);
hold(app.UIAxes,"on");

```

Κεφάλαιο 4

```
        legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr'
, app.rain_rate_3.Value), 'Location','SouthEast');
    end
    if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1 && app.CheckBox_4.Value==1
        cla(app.UIAxes)
        plot(app.UIAxes,dplot,totalloss)
        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,dplot,totalloss2);
        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,dplot,totalloss3);
        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,dplot,totalloss4);
        hold(app.UIAxes,"on");
        legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value),sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_4.Value),'Location','SouthEast');
    end
    if app.CheckBox_2.Value==1 && app.CheckBox_3.Value==1 && app.CheckBox_4.Value==1 && app.CheckBox_5.Value==1
        cla(app.UIAxes)
        plot(app.UIAxes,dplot,totalloss)
        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,dplot,totalloss2);
        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,dplot,totalloss3);
        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,dplot,totalloss4);
        hold(app.UIAxes,"on");
        plot(app.UIAxes,dplot,totalloss5);
        legend(app.UIAxes,sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_2.Value), sprintf('%d mm/hr' ,
app.rain_rate_3.Value), sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_4.Value),sprintf('%d mm/hr' , app.rain_rate_5.Value),'Location','SouthEast');
    end

end
end
```

Clear Button

```
cla(app.UIAxes)
app.distancedata.Value=0;
app.frequency.Value=0;
app.distance.Value=0;
app.rain_rate.Value=0;
app.rain_rate_2.Value=0;
app.rain_rate_3.Value=0;
app.rain_rate_4.Value=0;
app.rain_rate_5.Value=0;
app.tiltangle.Value=0;
app.loss.Value=0;
app.lossdata.Value=0;
app.total.Value=0;
app.total2.Value=0;
app.lossdatatotal.Value=0;
app.CheckBox_2.Value=0;
app.CheckBox_3.Value=0;
app.CheckBox_4.Value=0;
```

```
app.CheckBox_5.Value=0;  
app.CheckBox_1.Value=0;
```